



Acerca de este libro

Esta es una copia digital de un libro que, durante generaciones, se ha conservado en las estanterías de una biblioteca, hasta que Google ha decidido escanearlo como parte de un proyecto que pretende que sea posible descubrir en línea libros de todo el mundo.

Ha sobrevivido tantos años como para que los derechos de autor hayan expirado y el libro pase a ser de dominio público. El que un libro sea de dominio público significa que nunca ha estado protegido por derechos de autor, o bien que el período legal de estos derechos ya ha expirado. Es posible que una misma obra sea de dominio público en unos países y, sin embargo, no lo sea en otros. Los libros de dominio público son nuestras puertas hacia el pasado, suponen un patrimonio histórico, cultural y de conocimientos que, a menudo, resulta difícil de descubrir.

Todas las anotaciones, marcas y otras señales en los márgenes que estén presentes en el volumen original aparecerán también en este archivo como testimonio del largo viaje que el libro ha recorrido desde el editor hasta la biblioteca y, finalmente, hasta usted.

Normas de uso

Google se enorgullece de poder colaborar con distintas bibliotecas para digitalizar los materiales de dominio público a fin de hacerlos accesibles a todo el mundo. Los libros de dominio público son patrimonio de todos, nosotros somos sus humildes guardianes. No obstante, se trata de un trabajo caro. Por este motivo, y para poder ofrecer este recurso, hemos tomado medidas para evitar que se produzca un abuso por parte de terceros con fines comerciales, y hemos incluido restricciones técnicas sobre las solicitudes automatizadas.

Asimismo, le pedimos que:

- + *Haga un uso exclusivamente no comercial de estos archivos* Hemos diseñado la Búsqueda de libros de Google para el uso de particulares; como tal, le pedimos que utilice estos archivos con fines personales, y no comerciales.
- + *No envíe solicitudes automatizadas* Por favor, no envíe solicitudes automatizadas de ningún tipo al sistema de Google. Si está llevando a cabo una investigación sobre traducción automática, reconocimiento óptico de caracteres u otros campos para los que resulte útil disfrutar de acceso a una gran cantidad de texto, por favor, envíenos un mensaje. Fomentamos el uso de materiales de dominio público con estos propósitos y seguro que podremos ayudarle.
- + *Conserve la atribución* La filigrana de Google que verá en todos los archivos es fundamental para informar a los usuarios sobre este proyecto y ayudarles a encontrar materiales adicionales en la Búsqueda de libros de Google. Por favor, no la elimine.
- + *Manténgase siempre dentro de la legalidad* Sea cual sea el uso que haga de estos materiales, recuerde que es responsable de asegurarse de que todo lo que hace es legal. No dé por sentado que, por el hecho de que una obra se considere de dominio público para los usuarios de los Estados Unidos, lo será también para los usuarios de otros países. La legislación sobre derechos de autor varía de un país a otro, y no podemos facilitar información sobre si está permitido un uso específico de algún libro. Por favor, no suponga que la aparición de un libro en nuestro programa significa que se puede utilizar de igual manera en todo el mundo. La responsabilidad ante la infracción de los derechos de autor puede ser muy grave.

Acerca de la Búsqueda de libros de Google

El objetivo de Google consiste en organizar información procedente de todo el mundo y hacerla accesible y útil de forma universal. El programa de Búsqueda de libros de Google ayuda a los lectores a descubrir los libros de todo el mundo a la vez que ayuda a autores y editores a llegar a nuevas audiencias. Podrá realizar búsquedas en el texto completo de este libro en la web, en la página <http://books.google.com>



A propos de ce livre

Ceci est une copie numérique d'un ouvrage conservé depuis des générations dans les rayonnages d'une bibliothèque avant d'être numérisé avec précaution par Google dans le cadre d'un projet visant à permettre aux internautes de découvrir l'ensemble du patrimoine littéraire mondial en ligne.

Ce livre étant relativement ancien, il n'est plus protégé par la loi sur les droits d'auteur et appartient à présent au domaine public. L'expression "appartenir au domaine public" signifie que le livre en question n'a jamais été soumis aux droits d'auteur ou que ses droits légaux sont arrivés à expiration. Les conditions requises pour qu'un livre tombe dans le domaine public peuvent varier d'un pays à l'autre. Les livres libres de droit sont autant de liens avec le passé. Ils sont les témoins de la richesse de notre histoire, de notre patrimoine culturel et de la connaissance humaine et sont trop souvent difficilement accessibles au public.

Les notes de bas de page et autres annotations en marge du texte présentes dans le volume original sont reprises dans ce fichier, comme un souvenir du long chemin parcouru par l'ouvrage depuis la maison d'édition en passant par la bibliothèque pour finalement se retrouver entre vos mains.

Consignes d'utilisation

Google est fier de travailler en partenariat avec des bibliothèques à la numérisation des ouvrages appartenant au domaine public et de les rendre ainsi accessibles à tous. Ces livres sont en effet la propriété de tous et de toutes et nous sommes tout simplement les gardiens de ce patrimoine. Il s'agit toutefois d'un projet coûteux. Par conséquent et en vue de poursuivre la diffusion de ces ressources inépuisables, nous avons pris les dispositions nécessaires afin de prévenir les éventuels abus auxquels pourraient se livrer des sites marchands tiers, notamment en instaurant des contraintes techniques relatives aux requêtes automatisées.

Nous vous demandons également de:

- + *Ne pas utiliser les fichiers à des fins commerciales* Nous avons conçu le programme Google Recherche de Livres à l'usage des particuliers. Nous vous demandons donc d'utiliser uniquement ces fichiers à des fins personnelles. Ils ne sauraient en effet être employés dans un quelconque but commercial.
- + *Ne pas procéder à des requêtes automatisées* N'envoyez aucune requête automatisée quelle qu'elle soit au système Google. Si vous effectuez des recherches concernant les logiciels de traduction, la reconnaissance optique de caractères ou tout autre domaine nécessitant de disposer d'importantes quantités de texte, n'hésitez pas à nous contacter. Nous encourageons pour la réalisation de ce type de travaux l'utilisation des ouvrages et documents appartenant au domaine public et serions heureux de vous être utile.
- + *Ne pas supprimer l'attribution* Le filigrane Google contenu dans chaque fichier est indispensable pour informer les internautes de notre projet et leur permettre d'accéder à davantage de documents par l'intermédiaire du Programme Google Recherche de Livres. Ne le supprimez en aucun cas.
- + *Rester dans la légalité* Quelle que soit l'utilisation que vous comptez faire des fichiers, n'oubliez pas qu'il est de votre responsabilité de veiller à respecter la loi. Si un ouvrage appartient au domaine public américain, n'en déduisez pas pour autant qu'il en va de même dans les autres pays. La durée légale des droits d'auteur d'un livre varie d'un pays à l'autre. Nous ne sommes donc pas en mesure de répertorier les ouvrages dont l'utilisation est autorisée et ceux dont elle ne l'est pas. Ne croyez pas que le simple fait d'afficher un livre sur Google Recherche de Livres signifie que celui-ci peut être utilisé de quelque façon que ce soit dans le monde entier. La condamnation à laquelle vous vous exposeriez en cas de violation des droits d'auteur peut être sévère.

À propos du service Google Recherche de Livres

En favorisant la recherche et l'accès à un nombre croissant de livres disponibles dans de nombreuses langues, dont le français, Google souhaite contribuer à promouvoir la diversité culturelle grâce à Google Recherche de Livres. En effet, le Programme Google Recherche de Livres permet aux internautes de découvrir le patrimoine littéraire mondial, tout en aidant les auteurs et les éditeurs à élargir leur public. Vous pouvez effectuer des recherches en ligne dans le texte intégral de cet ouvrage à l'adresse <http://books.google.com>



THE LIBRARY
OF THE



CLASS En620.6
BOOK q5011

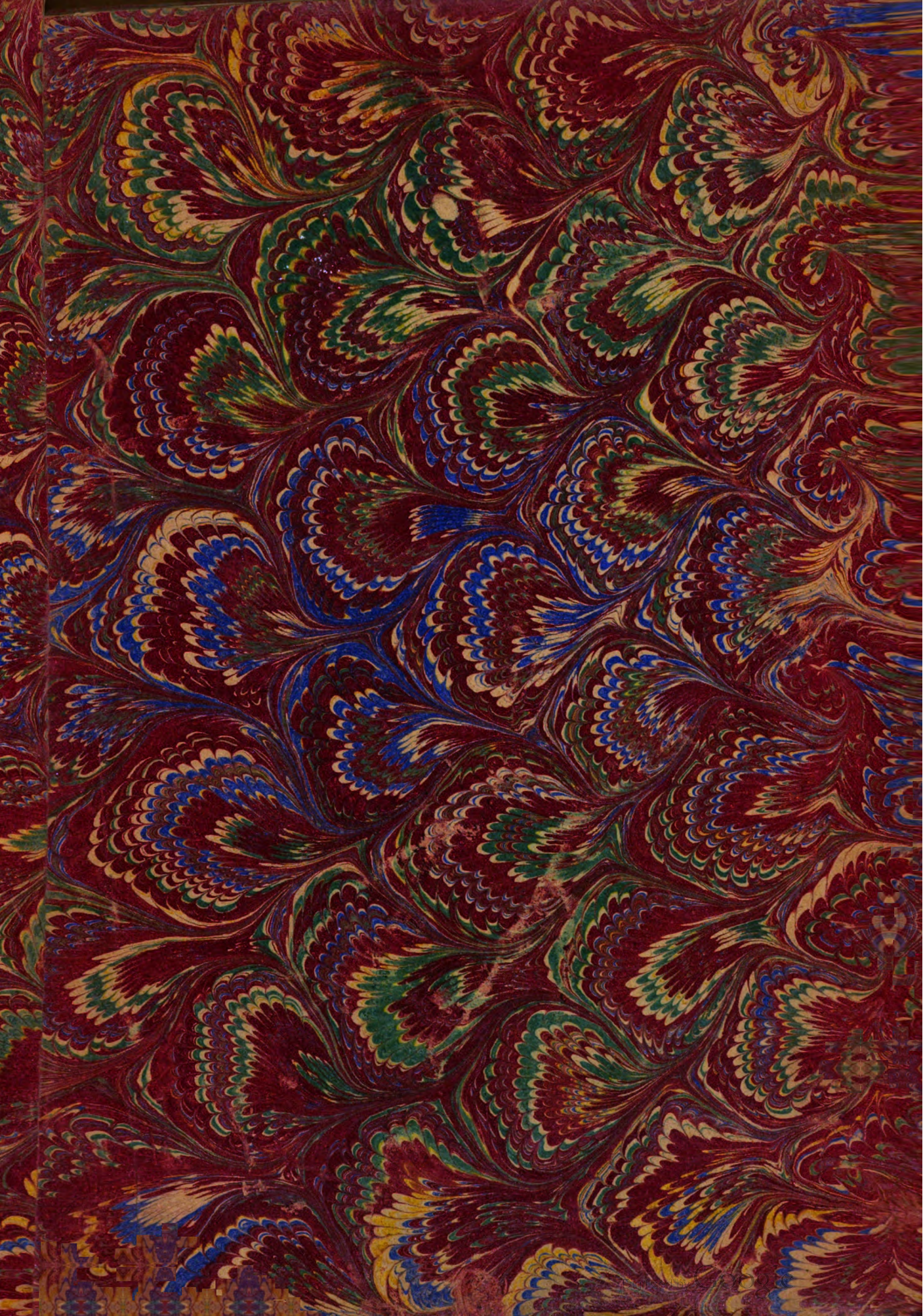


THE LIBRARY
OF THE



CLASS En 620.6

BOOK q 5011



THE LIBRARY
OF THE



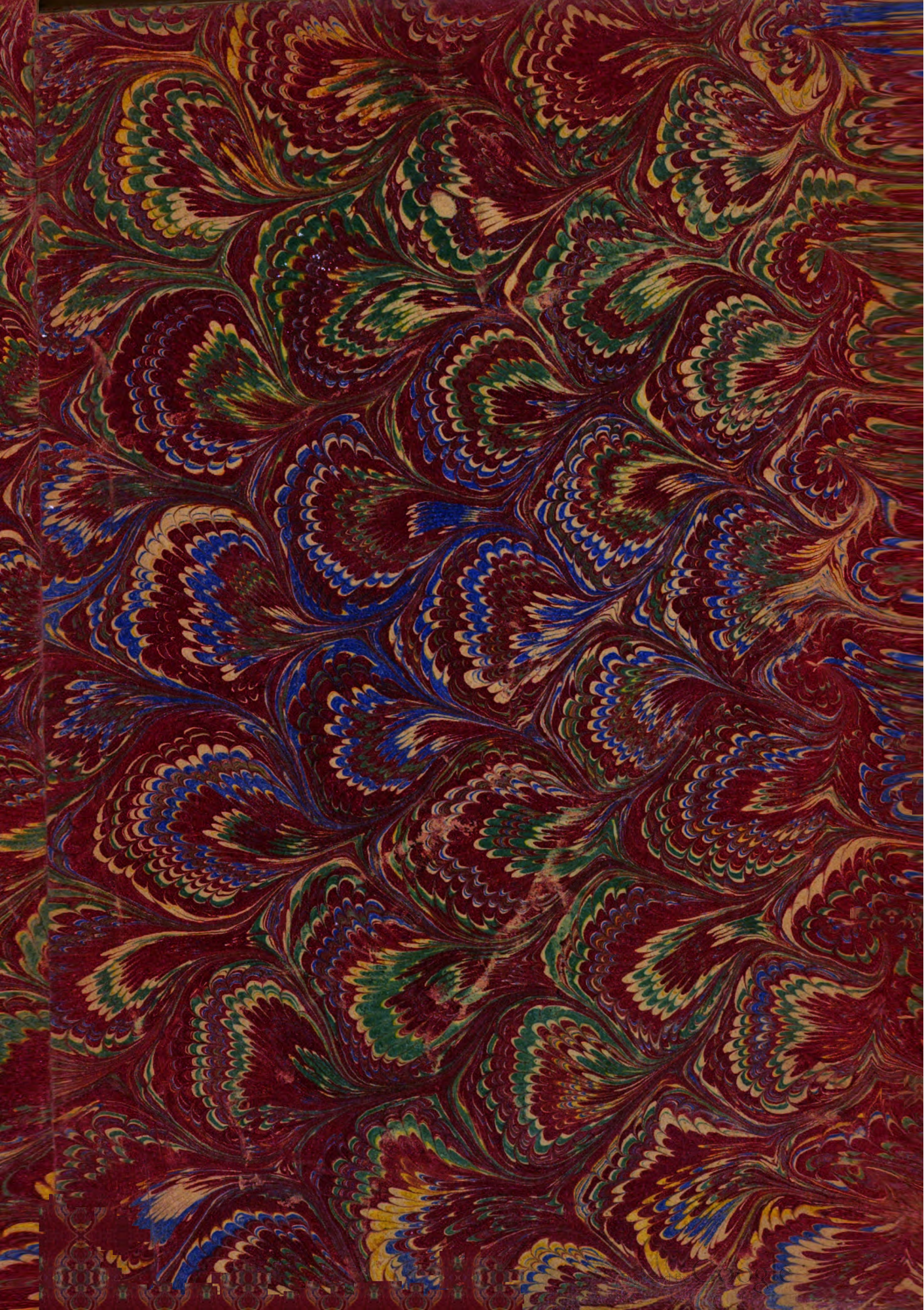
CLASS En620.6
BOOK q5011



THE LIBRARY
OF THE



CLASS En620.6
BOOK q5011



BULLETIN
DE LA
SOCIÉTÉ INTERNATIONALE
DES
ÉLECTRICIENS.

46584

PARIS. — IMPRIMERIE GAUTHIER-VILLARS,
Quai des Grands-Augustins, 55.

BULLETIN
DE LA
SOCIÉTÉ INTERNATIONALE
DES
ÉLECTRICIENS.

LA SOCIÉTÉ INTERNATIONALE DES ÉLECTRICIENS A ÉTÉ RECONNUE D'UTILITÉ PUBLIQUE LE 7 DÉCEMBRE 1886.

TROISIÈME SÉRIE.
TOME I. — ANNÉE 1911.



SIÈGE SOCIAL }
LABORATOIRE } 12 et 14, rue de Staël
à Paris.

PARIS,

GAUTHIER-VILLARS, IMPRIMEUR-LIBRAIRE
DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE,
Quai des Grands-Augustins, 55.

1911

UNIVERSITY OF
MINNESOTA
LIBRARY

TO VIOGABU
ATOBENAI
YUAPU

BULLETIN

DE LA

SOCIÉTÉ INTERNATIONALE

DES

ÉLECTRICIENS.

SOMMAIRE.

Compte rendu de la réunion mensuelle de janvier 1911 : Admission de membres titulaires, p. 6. — Communication du Laboratoire central d'Electricité au sujet des Unités électriques (M. P. Janet), p. 9. — Surtensions, Surintensités et destruction des isolants par l'ozone (M. Giles), p. 13. Observations (MM. Grosselin, Boucherot et Giles), p. 37 et suivantes. — Les propriétés magnétiques du fer aux fréquences élevées (M. Jouaust), p. 49.

BIBLIOGRAPHIE, p. 58.

OUVRAGES OFFERTS, p. 63.

COMPTE RENDU

DE LA

RÉUNION ORDINAIRE MENSUELLE

du mercredi 11 janvier 1911 ⁽¹⁾.

PRÉSIDENCE DE M. A. BOCHET.

La séance est ouverte à 8 h 35 m du soir.

Le procès-verbal de la dernière réunion mensuelle est adopté.

Il est donné connaissance des Ouvrages offerts à la Bibliothèque (voir p. 63) et des demandes d'admissions suivantes :

⁽¹⁾ La Société n'est pas solidaire des opinions émises par ses Membres dans les discussions ni responsable des Notes ou Mémoires publiés dans le *Bulletin*.

493019

MM.

- André** (Emile-Louis), Elève à l'*Ecole supérieure d'Electricité*, 5, rue Chomel, à Paris. — Présenté par MM. Janet et Chaumat.
- Baignères** (Gustave), Ingénieur adjoint des Services techniques de l'*Exploitation des Chemins de fer de l'Est*, 3, avenue Victor-Hugo, à Paris. — Présenté par MM. Bochet et Brunswick.
- Bancarel** (Pierre-Idesbalde-Marie ~~de~~), Elève à l'*Ecole supérieure d'Electricité*, 42, rue du Ranelagh, à Paris. — Présenté par MM. Janet et Chaumat.
- Bayle** (Félix-L.-A.), Mécanicien principal de 1^{re} classe de la Marine, Elève à l'*Ecole supérieure d'Electricité*, 18, rue Dutot, à Paris. — Présenté par MM. Janet et Chaumat.
- Besson** (Louis-Henri), Ingénieur chef du *Service des Turbines à vapeur aux Mines de Lens*, 34, rue Edouard-Bollaert, à Lens (Pas-de-Calais). — Présenté par MM. Bochet et Reumaux.
- Blavet** (Pierre), Sapeur-télégraphiste à la 3^e Compagnie, Mont-Valérien, 177, boulevard Péreire, à Paris. — Présenté par MM. Groslier et Landry.
- Bollevin** (Jules), Elève à l'*Ecole supérieure d'Electricité*, 20, rue de l'Ecliquier, à Paris. — Présenté par MM. Janet et Chaumat.
- Brunot** (Jacques-Pierre-Bernard), Elève à l'*Ecole supérieure d'Electricité*, 38, rue de Berlin, à Paris. — Présenté par MM. Janet et Chaumat.
- Buisson** (Paul-Joseph-Antoine), Elève à l'*Ecole supérieure d'Electricité*, 19, avenue de Breteuil, à Paris. — Présenté par MM. Janet et Chaumat.
- Caminati** (Carlo), Elève à l'*Ecole supérieure d'Electricité*, 8, villa Ségur, à Paris. — Présenté par MM. Janet et Chaumat.
- Capon** (René-Joseph), Elève à l'*Ecole supérieure d'Electricité*, 2, boulevard Garibaldi, à Paris. — Présenté par MM. Janet et Chaumat.
- Chappée** (Ferdinand-Léon), Elève à l'*Ecole supérieure d'Electricité*, à Dammarie-les-Lys (Seine-et-Marne). — Présenté par MM. Janet et Chaumat.
- Costabel** (Antoine-Henri-Louis), Elève à l'*Ecole supérieure d'Electricité*, 8, rue Edme-Guillout, à Paris. — Présenté par MM. Janet et Chaumat.
- Crasner** (Nicou), Licencié ès sciences, Elève à l'*Ecole supérieure d'Electricité*, 7, rue Théophile-Roussel, à Paris. — Présenté par MM. Janet et Chaumat.
- Dalmon** (Eugène-Adolphe), Ingénieur de la *Compagnie générale d'Electricité de Creil*, 71, rue Alsace-Lorraine, à Toulouse (Haute-Garonne). — Présenté par MM. Boucherot et L. Jénnot.
- Dennery** (Alfred), Inspecteur général des *Postes et des Télégraphes*, Directeur de l'*Ecole supérieure des Postes et des Télégraphes*, 131, boulevard Malesherbes, à Paris. — Présenté par MM. Bochet et Janet.
- Diot** (Marcel-Emile), Elève à l'*Ecole supérieure d'Electricité*, 19, rue Nollet, à Paris. — Présenté par MM. Janet et Chaumat.
- Dubols** (Henri-Edmond-Louis), Elève à l'*Ecole supérieure d'Electricité*, 18, rue Nélaton, à Paris. — Présenté par MM. Janet et Chaumat.
- Dupau** (Charles), Elève à l'*Ecole supérieure d'Electricité*, 41, rue Denfert-Rochereau, à Paris. — Présenté par MM. Janet et Chaumat.
- Dupuis** (Lucien-Georges), Elève à l'*Ecole supérieure d'Electricité*, 230, rue Saint-Denis, à Paris. — Présenté par MM. Janet et Chaumat.
- Evain** (Alfred), Ingénieur-Electricien (I. E. N.), aux *Aciéries de Longwy*, à Mont-Saint-Martin (Meurthe-et-Moselle). — Présenté par MM. Bochet et Winch.

MM.

- Fauconneau** (Albert), Elève à l'*Ecole supérieure d'Electricité*, 39, boulevard Garibaldi, à Paris. — Présenté par MM. Janet et Chaumat.
- François** (André), Elève à l'*Ecole supérieure d'Electricité*, 37, boulevard Arago, à Paris. — Présenté par MM. Janet et Chaumat.
- Gaucher** (Henri-Ernest), Elève à l'*Ecole supérieure d'Electricité*, 68, rue Gay-Lussac, à Paris. — Présenté par MM. Janet et Chaumat.
- Gauthier** (Paul-Jean-François), Ingénieur principal aux *Mines de Carvin*, à Carvin (Pas-de-Calais). — Présenté par MM. Brunswick et Mouchard.
- Gaydan** (Alfred), Elève à l'*Ecole supérieure d'Electricité*, 18, rue Victor-Aubry, à Gagny (Seine-et-Oise). — Présenté par MM. Janet et Chaumat.
- Hatfield** (Henry-Stafford), Collaborateur scientifique de la *Verrerie Schott et Genossen*, 12, Lobdergraben, à Iéna (Allemagne). — Présenté par MM. Richard Heller et de Valbreuze.
- Jouen** (René-Stanislus), Enseigne de vaisseau, Elève à l'*Ecole supérieure d'Electricité*, 3, rue Bague, à Paris. — Présenté par MM. Janet et Chaumat.
- Lagarigue** (Jean-Joseph), Elève à l'*Ecole supérieure d'Electricité*, 18, rue du Banquier, à Paris. — Présenté par MM. Janet et Chaumat.
- Landis et Gyr**, *Fabrique d'Appareils électriques*, à Zoug (Suisse). — Présenté par MM. Janet et Ch. David.
- Lapine** (Michel), Elève à l'*Ecole supérieure d'Electricité*, 31, rue de Vaugirard, à Paris. — Présenté par MM. Janet et Chaumat.
- Laurent** (Pierre-Jules), Elève à l'*Ecole supérieure d'Electricité*, 43, rue de Douai, à Paris. — Présenté par MM. Janet et Chaumat.
- Legeron** (Gaetan-Francis), Elève à l'*Ecole d'Electricité et de Mécanique industrielles*, 50, rue Violet, à Paris. — Présenté par MM. E. Guillon et Sogno-Lafongt.
- Louis** (Charles-Paul), Capitaine d'Artillerie, 26, rue Ernest-Renan, à Paris. — Présenté par MM. Janet et Chaumat.
- Malaterre** (Henri), Elève à l'*Ecole supérieure d'Electricité*, 18, rue de Varenne, à Paris. — Présenté par MM. Janet et Chaumat.
- Mans** (Paul de), Elève à l'*Ecole d'Electricité et de Mécanique industrielles*, 26, boulevard de Lesseps, à Versailles (Seine-et-Oise). — Présenté par MM. E. Guillon et Sogno-Lafongt.
- Martineau** (Alcide), Elève à l'*Ecole supérieure d'Electricité*, 126, rue du Cherche-Midi, à Paris. — Présenté par MM. Janet et Chaumat.
- Masnou** (Maurice), Elève à l'*Ecole supérieure d'Electricité*, 8, rue Edme-Guillout, à Paris. — Présenté par MM. Janet et Chaumat.
- Massey** (Edouard-Jean), Elève à l'*Ecole supérieure d'Electricité*, à Nogent-sur-Marne (Seine). — Présenté par MM. Janet et Chaumat.
- Minard** (Paul), Ingénieur (I. E. G.), Inspecteur des Services électriques de la *Société des Mines de Lens*, 26, rue Edouard-Bollaert, à Lens (Pas-de-Calais). — Présenté par MM. Foulhouze et Rouyer.
- Moune** (Bertrand), Elève à l'*Ecole supérieure d'Electricité*, 43, boulevard du Montparnasse, à Paris. — Présenté par MM. Janet et Chaumat.
- Nimier** (Paul-Edouard-Joseph), Elève à l'*Ecole supérieure d'Electricité*, 8, rue Edme-Guillout, à Paris. — Présenté par MM. Janet et Chaumat.

MM.

Payet (Pierre-Louis), Elève à l'*Ecole supérieure d'Electricité*, 5, place de Rennes, à Paris.
— Présenté par MM. Janet et Chaumat.

Poltrimol (Paul), Ingénieur à la *Compagnie française Thomson-Houston*, 145, rue de Tolbiac, à Paris. — Présenté par MM. Girault et Jouvenel.

Reymond (Henri-Claude), Enseigne de vaisseau, 2, rue Leneveu, à Paris. — Présenté par MM. Janet et Chaumat.

Rosenwald (Gabriel-Benjamin), Elève à l'*Ecole supérieure d'Electricité*, 11, rue de Lisbonne, à Paris. — Présenté par MM. Janet et Chaumat.

Rouganne (Paul), Elève à l'*Ecole d'Electricité et de Mécanique industrielles*, 50, rue Violet, à Paris. — Présenté par MM. E. Guillon et Sogno-Lafongt.

Tauléra (Marcel-Louis-Eugène), Licencié ès sciences, Elève à l'*Ecole supérieure d'Electricité*, 73, rue Claude-Bernard, à Paris. — Présenté par MM. Janet et Chaumat.

Trublereau (Claude), Ingénieur (A. M.), Elève à l'*Ecole supérieure d'Electricité*, 4, rue Bertrand, à Paris. — Présenté par MM. Janet et Chaumat.

Vack (Gabriel-Maurice), Elève à l'*Ecole supérieure d'Electricité*, 3, rue Nicolas-Charlet, à Paris. — Présenté par MM. Janet et Chaumat.

Vincent (Albert), Ingénieur (A. M.), Elève à l'*Ecole supérieure d'Electricité*, 4, rue Ortolan à Paris. — Présenté par MM. Janet et Chaumat.

Waganoff (Alexandre-Nicolajevitch de), Elève à l'*Ecole supérieure d'Electricité*, 1, rue Paul-Saunière, à Paris. — Présenté par MM. Janet et Chaumat.

Ces candidats sont élus membres titulaires de la Société internationale des Électriciens.

M. le PRÉSIDENT signale une Communication relative aux unités électriques adressée aux Sociétés intéressées par le Laboratoire central d'Électricité et donne la parole à M. P. Janet (voir texte et commentaires p. 9).

L'ordre du jour appelle les Communications techniques.

**LES UNITÉS ÉLECTRIQUES EMPLOYÉES AU LABORATOIRE CENTRAL D'ÉLECTRICITÉ
A PARTIR DU 1^{er} JANVIER 1911.**

MONSIEUR LE PRÉSIDENT,

J'ai l'honneur de vous envoyer une Note relative aux unités électriques employées au Laboratoire central d'Électricité conformément aux décisions du Comité scientifique international des Unités et étalons électriques.

J'espère que la connaissance de cette Note est de nature à intéresser les membres de notre Société.

» Veuillez agréer, Monsieur le Président, l'assurance de ma considération la plus distinguée.

Le directeur du Laboratoire,

P. JANET.

« D'après la décision de la Conférence internationale de Londres (1908) la valeur, en volt international, de la force électromotrice de l'élément Weston normal (contenant un excès de cristaux de sulfate de cadmium) doit être déduite de l'ohm international défini comme résistance mercurielle et de l'ampère international défini par un dépôt d'argent dans un voltamètre à azotate d'argent.

» La valeur provisoire à 20° avait été fixée en 1908 à 1,0184.

» Le Comité scientifique international nommé à Londres décida que des expériences seraient faites au printemps 1910 au Bureau of Standards à Washington par des représentants de la Physikalisch technische Reichsanstalt d'Allemagne, du National Physical Laboratory d'Angleterre, du Bureau of Standards des États-Unis et du Laboratoire central d'Électricité. Le but assigné à ces recherches était de fixer la valeur qu'il convenait de prendre pour la force électromotrice du Weston en précisant les conditions expérimentales dans lesquelles devait être effectué le dépôt d'argent.

» A la suite de ces mesures, le Comité international des Unités électriques a décidé de recommander, pour la valeur de la force

électromotrice de l'étalon Weston normal, à 20° :

1,0183 volt international.

» Le Laboratoire central d'Électricité se conforme à cette recommandation depuis le 1^{er} janvier 1911, ce qui entraîne aussi pour les mesures de résistance l'adoption de l'ohm international tel qu'il a été provisoirement réalisé dans les expériences de Washington.

» Cette manière de faire n'est pas contradictoire avec le décret du 25 avril 1896 sur les unités électriques en France, car cela revient à admettre que l'élément Latimer Clark a la force électromotrice 1,434 à la température de 13°,8, le décret n'ayant pas fixé la température à laquelle la force électromotrice de l'élément doit être mesurée. »

M. P. JANET ajoute à cette Note les quelques observations suivantes :

« 1° En ce qui concerne le volt, le Laboratoire central adoptait, jusqu'au 31 décembre dernier, la valeur 1,434 pour l'élément Latimer-Clark, conformément au décret du 25 avril 1896, et, suivant les instructions qui accompagnent ce décret, il admettait que cette valeur était exacte à 15°. D'après les expériences les plus précises sur le rapport du Weston à 20° au Clark à 15°, prendre 1,0183 pour le Weston à 20° revient à prendre 1,4326 pour le Clark à 15°, ou inversement à admettre que la valeur 1,434 se rapporte non pas à 15°, mais à 13°,8; comme il a été remarqué dans la Note précédente, une lacune heureuse dans le décret de 1896 permet ce changement.

» Il y a fort longtemps d'ailleurs qu'on sait que la valeur 1,434 à 15° du Clark n'est pas compatible avec la valeur 1,118 pour le dépôt d'argent.

» 2° En ce qui concerne l'ohm, jusqu'au 31 décembre dernier, le Laboratoire central d'Électricité partait des copies mercurielles de l'ohm légal établies en 1884 par M. Benoît en appliquant à ces copies le facteur de correction $\frac{106,3}{106}$ pour les transformer en ohm international. Des mesures nombreuses, précises et concordantes, qui ont été à plusieurs reprises publiées dans notre *Bulletin*, ont montré

que cet ohm ainsi défini était de $\frac{1}{10000}$ inférieur à l'ohm international adopté dans un grand nombre de pays étrangers à la suite de la réalisation de prototypes conformes aux définitions de Chicago (1893). Il paraît certain que les ohms internationaux prototypes que M. Benoît étudie actuellement concorderont à un degré de précision beaucoup plus élevé avec les prototypes étrangers, soit déjà construits, soit en construction. Dans ces conditions, il nous a paru indispensable de modifier notre ohm de $\frac{1}{10000}$ pour nous mettre entièrement d'accord avec les mesures internationales. D'ailleurs, comme il est rappelé dans le texte de la Note ci-dessus, cette modification est obligatoire, si nous voulons, conformément aux décisions de la conférence de Londres, définir l'ampère par le dépôt d'argent et le nombre 1,11800, et d'après les expériences de Washington, auxquelles notre Laboratoire a pris une part importante, adopter pour le Weston à 20° la valeur 1,0183.

» 3° Enfin, en ce qui concerne la différence de $\frac{1}{10000}$ que les expériences de Washington ont amené à apporter à la force électromotrice de l'élément Weston (1,0183 au lieu de 1,0184), nous ferons observer qu'elle est due à l'amélioration dans les conditions du dépôt de l'argent dans le voltamètre à argent.

» 4° J'ai à peine besoin de rappeler que toutes ces valeurs correspondent aux définitions matérielles de l'ohm international et de l'ampère international, conformes aux décisions de Londres; leur rattachement au système C. G. S. devient une opération d'ordre purement scientifique. D'ailleurs, les différences entre les valeurs internationales et les valeurs théoriques C. G. S. des unités sont certainement très petites; on peut affirmer qu'elles sont inférieures à 0,0004 pour l'ohm et à 0,0002 pour l'ampère, l'ohm international étant légèrement supérieur à l'ohm vrai et l'ampère international étant légèrement inférieur à l'ampère vrai. Il en résulte que le watt international est extrêmement voisin du watt vrai.

M. le PRÉSIDENT remercie M. P. Janet.

SURTENSIONS, SURINTENSITÉS ET DESTRUCTIONS DES ISOLANTS PAR L'OZONE.

M. G. GILES. — « Messieurs, le problème de la protection des réseaux contre les surtensions présente un intérêt qui va en augmentant au fur et à mesure qu'on adopte dans les centrales des unités plus fortes.

» Les quantités d'énergie qui entrent en jeu dans un grand réseau sont telles que les perturbations de régime amènent des accidents d'une violence extraordinaire.

» De plus, ces accidents atteignant des unités de plusieurs milliers de kilowatts, nécessitent des réparations importantes qui sont très onéreuses pour l'exploitation.

» Il est naturel de classer les courants parasites qui se développent dans un réseau d'après les caractères qui les différencient du courant du réseau lui-même. L'un de ces caractères principaux est la fréquence.

» On peut également les classer suivant leur origine et distinguer deux catégories suivant qu'ils se développent sous l'influence d'actions extérieures ou intérieures.

» Pour cette raison, nous adopterons les divisions suivantes :

» Tout d'abord *les surtensions développées par des causes extérieures au réseau* (actions atmosphériques), et, dans cette première classe, nous distinguerons :

» 1^o Les *charges statiques* se manifestant sous forme de courant continu (fréquence zéro);

» 2^o Les *courants inductifs* que nous démontrerons être à haute fréquence;

» Puis, en second lieu, *les surtensions d'origine intérieure au réseau*, ces surtensions étant dues à des perturbations brusques de régime.

» Nous montrerons que ces actions sont à moyenne fréquence c'est-à-dire de l'ordre de quelques milliers de périodes.

» Cette classification nous montre de suite dans quelle voie il faut chercher la solution du problème.

» Le but qu'on se propose est de trouver des appareils qui ouvrent un libre écoulement au passage des courants parasites, de façon que, dans aucun cas, ceux-ci ne puissent atteindre une tension dangereuse. Il faut également que ces mêmes appareils ne laissent passer le courant du réseau qu'en quantité aussi petite que possible ou du moins pendant un temps assez faible pour qu'on n'ait pas à se préoccuper de leur donner une capacité calorifique capable d'absorber une portion appréciable de l'énergie des machines.

» Enfin ces appareils devront être tels que leur introduction brusque dans le circuit n'amène pas de perturbations assez violentes pour engendrer de nouvelles surtensions.

» En somme, nous cherchons une sorte de filtre laissant passer les surtensions seules, et c'est pour cette raison que nous les avons classées d'après leur fréquence, c'est-à-dire d'après les caractères qui les différencient le plus du courant du réseau.

» Examinons maintenant les différentes natures de perturbations :

» *Charges statiques.* — Les charges sont créées dans la ligne soit par l'approche de corps électrisés (nuages, neige, grêle, etc.), soit par des différences dans le potentiel des couches atmosphériques.

» Les charges statiques tendent à s'écouler à la terre sous forme de courant continu.

» On se pose donc le problème de trouver un appareil laissant passer le courant continu et non le courant alternatif des machines. La solution immédiate consiste à relier chaque conducteur à la terre par l'intermédiaire d'une bobine de self-induction à noyau de fer ayant une faible résistance ohmique. Si la self de l'appareil est assez grande, le débit en alternatif dévatté sera insignifiant; si sa résistance ohmique est assez faible, le débit pour le courant continu pourra être considérable. Ces bobines écoulent les charges statiques à partir du moment même où celles-ci commenceront à se développer. C'est de toute évidence l'appareil le plus parfait qui existe et tous les autres appareils actuellement connus ne seront que des palliatifs, la plupart du temps insuffisants.

» Les appareils à jet d'eau par exemple, qui ont le même débit en alternatif et en continu, devront avoir une très grande résistance ohmique, ce qui ne les empêchera pas de dépenser continuellement et inutilement une grande quantité d'énergie tout en ayant une efficacité assez faible contre les charges statiques.

» Les parafoudres à cornes auront le défaut de ne commencer à fonctionner que quand la surtension aura déjà acquis une valeur dangereuse. De plus, même quand ils entreront en jeu, ils n'auront qu'un faible débit, car, pour éviter que ces appareils ne créent par leur fonctionnement des résonances et des surtensions dangereuses, on doit toujours les mettre en série avec de grandes résistances dont la valeur varie de 20 000 à 40 000 ohms suivant les tensions d'emploi.

» On ne peut nier l'importance de ces phénomènes. De nombreux électriciens se sont faits secouer en touchant des lignes non sous tension et il n'est pas rare qu'on puisse tirer de ces mêmes lignes des étincelles de 15 à 20 mm de longueur, correspondant à des tensions suffisantes pour crever les isolations des appareils.

» *Courants inductifs.* — La logique doit nous faire chercher un appareil présentant une grande résistance à l'écoulement des courants de la fréquence du réseau et une très faible résistance pour les ondes ayant la fréquence des décharges atmosphériques. Nous pourrions distinguer deux sortes d'appareils :

» *a.* Les appareils à fonctionnement discontinu, tel que le parafoudre à cornes ou à rouleaux;

» *b.* L'appareil à fonctionnement continu, tel que le condensateur.

» Chacune de ces deux sortes d'appareils agira d'une façon différente suivant que les phénomènes atmosphériques pourront être considérés comme étant à haute ou à basse fréquence.

» S'il s'agit de haute fréquence, il se propagera le long de la ligne des ondes à courtes périodes présentant des maxima de tension alternativement positifs et négatifs, deux de ces maxima étant séparés par une faible longueur de fil (*fig. 1*). Ces ondes pénétrant dans les bobinages des machines, la totalité de la différence du potentiel de la décharge pourra être appliquée entre deux

» Des appareils de ce genre ne suffiront donc pas à empêcher les ondes de la décharge de pénétrer dans les enroulements. On aura simplement une illusion de fonctionnement due au soufflage de l'arc créé par le passage du courant des machines.

» Si, au contraire, les décharges étaient à fréquence moyenne, on ne pourrait déclarer *a priori* que ce genre de parafoudre est insuffisant, car la surtension peut dépasser sans danger la tension de l'installation. Pour déterminer la valeur utile de l'appareil, il serait alors nécessaire d'entrer dans l'examen de sa puissance d'écoulement.

» D'autre part, pour de faibles fréquences, l'action d'un condensateur de petite capacité serait pratiquement négligeable. On voit de suite que la solution du problème dépend éventuellement de la détermination de la grandeur de la fréquence des décharges.

» Nous allons donc énumérer toutes les raisons qui font croire que les décharges atmosphériques inductives sont à haute fréquence, et citer des faits qui seraient inexplicables si l'on admettait l'hypothèse contraire.

» 1. Les actions atmosphériques étant évidemment les mêmes quelle que soit la tension de la ligne, on constate que, même sur les lignes à basse tension, il est assez rare que les isolateurs soient claqués. Ceci est vrai même pour des lignes à 2000 ou 3000 volts, bien que ces isolateurs ne puissent supporter plus de 15 000 à 20 000 volts. On doit donc en déduire que les décharges atmosphériques développées dans la ligne sont en général inférieures à ces tensions.

» D'autre part, ces mêmes actions atmosphériques détruisent des transformateurs à 20 000, 30 000 et 40 000 volts dont les enroulements sont capables de résister à des surtensions uniformément réparties égales à 2 ou 3 fois leur tension normale. Il est donc impossible d'admettre que les tensions qui les détruisent sont uniformément réparties le long de l'enroulement. On est alors conduit à croire qu'il s'agit de phénomènes de haute fréquence se propageant le long de l'enroulement et tels, par exemple, qu'un maximum positif et un maximum négatif ne soient séparés que par quelques mètres de fil. Dans ces conditions, la différence de

potentiel maxima de la décharge pourra très bien exister entre deux fils superposés et isolés par un simple guipage au coton, ce qui explique alors parfaitement leur crevaisson.

» 2. Tous les exploitants ont constaté qu'il n'arrivait pour ainsi dire jamais qu'une isolation crevât à la masse. Les perforations se produisent de *fil à fil* et presque toujours à *l'entrée de l'enroulement*. Si les phénomènes étaient à quelques milliers de périodes, l'action de la décharge se répartirait sur tout l'enroulement et la crevaisson se produirait de fil à fil en un point quelconque, tantôt à l'entrée, tantôt au milieu, et tantôt à la fin du bobinage. Avec la haute fréquence, au contraire, l'onde se propage au travers de l'enroulement avec des maxima alternativement positifs et négatifs qui vont en s'amortissant au fur et à mesure qu'on s'éloigne de la borne d'entrée. La plus grande différence de potentiel se trouve entre le premier maximum positif et le premier maximum négatif, c'est-à-dire à l'entrée du bobinage.

» 3. Nous avons constaté que, sur des batteries de condensateurs employées comme protection (*fig. 2*), les fusibles individuels

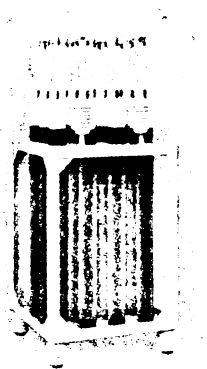


Fig. 2.

des éléments sont fondus quelquefois par les décharges violentes sans que les éléments eux-mêmes soient avariés. Ces coupe-circuits fondent à 3,5 ampères en 2 secondes et à 40 ampères environ en un centième de seconde. D'autre part, l'élément n'absorbe que 0,01 ampère sous 10 000 volts à la fréquence 50. Supposons que

la décharge ait une durée de un centième de seconde : puisque le fusible a fondu, c'est que le débit est momentanément passé de 0,01 à 40 ampères, c'est-à-dire a augmenté dans le rapport de 1 à 4000. Ceci n'est possible que si la tension ou la fréquence de la décharge est égale à 4000 fois la tension ou la fréquence du réseau. Il serait évidemment absurde de supposer que c'est la tension qui a augmenté dans cette proportion : on doit donc admettre que la décharge est à haute fréquence.

» Signalons que la batterie de condensateurs utilisée comprend ordinairement 12 éléments ayant chacun leur coupe-circuit; quand l'un des fusibles fond, on doit supposer qu'il est passé à ce moment une décharge d'une valeur efficace voisine de 12 fois 40 ampères, soit 480 ampères. Mais, en réalité, le premier maximum de la décharge amortie est bien plus considérable encore. Ceci donne une idée des intensités énormes qu'il faut écouler si l'on veut empêcher les ondes à haute fréquence de pénétrer dans les enroulements des machines.

» 4. Tous ceux qui s'occupent de télégraphie sans fil savent que les antennes sont influencées par les décharges atmosphériques. On sait d'autre part que ces antennes, accordées pour des fréquences de plusieurs centaines de mille périodes, resteraient parfaitement insensibles à des vibrations de fréquence peu élevée. On a même enregistré des décharges au moyen du détecteur à limaille et du détecteur électrolytique. On a donc la certitude absolue de la périodicité élevée de certains des phénomènes créés par les orages.

» 5. On a constaté sur tous les réseaux que, quand il se produisait un orage dans une région, seuls, les postes situés à proximité étaient influencés et recevaient les décharges. Cela tient à ce que ce sont des phénomènes de haute fréquence dont la propagation le long d'une ligne est rapidement amortie. S'il s'agissait de phénomènes à quelques milliers de périodes, tout le réseau serait influencé, car l'amortissement serait très faible.

» Notamment sur la ligne de transport Bellegarde-Lyon (triphase 40000 volts, 160 km) on a constaté que, quand un orage

éclatait au-dessus de Virieu-le-Grand, à 35 km de Bellegarde, l'usine de Bellegarde ne recevait pas les décharges.

» Ce fait précis nous montre non seulement que les actions sont à haute fréquence, mais encore qu'il ne s'agit pas d'oscillations libres qui mettraient toute la ligne en vibration, car alors les deux extrémités seraient particulièrement influencées; il s'agit, au contraire, d'oscillations forcées ayant la fréquence de la décharge et c'est exactement ce que nous avons supposé dans nos explications précédentes.

» On ne s'expliquerait d'ailleurs pas pourquoi tous les installateurs, sans exception, mettent devant les postes à protéger des bobines de self-induction sans noyau de fer, n'ayant que quelques spires et ne pouvant évidemment avoir d'influence que pour la haute fréquence. S'il s'agissait de basse fréquence, il serait absurde de mettre une telle bobine devant un enroulement de machine ayant lui-même une self-induction 100, 200 ou 500 fois plus considérable.

» 6. On a très souvent constaté sur les réseaux que les transformateurs claquaient par l'enroulement à haute tension et presque jamais par l'enroulement à basse tension. Ceci serait absolument inexplicable si l'on avait affaire à des décharges dont l'action soit répartie uniformément sur toute la longueur du bobinage, c'est-à-dire si les décharges étaient à basse fréquence. En effet, l'isolation globale du secondaire étant plus faible que celle du primaire et les décharges étant les mêmes pour les lignes haute et basse tension, on serait amené à conclure que les accidents doivent être plus nombreux dans le premier cas que dans le second.

» Si l'on suppose, au contraire, que les décharges sont à haute fréquence, les résultats de la pratique s'expliquent sans difficulté.

» Nous avons dit que les ondes se propagent au travers des enroulements en créant le long du conducteur un maximum de potentiel positif et négatif : deux maxima successifs positif et négatif peuvent n'être séparés que par une très petite longueur de fil. Si la fréquence est élevée, cette longueur de fil n'étant fonction que de la fréquence, de la self-induction et de la capacité kilométrique du conducteur, il en résulte qu'elle sera la même

pour le secondaire et pour le primaire si l'on suppose, ce qui est à peu près exact, que ces constantes sont les mêmes pour les deux enroulements.

» Supposons, par exemple, que la longueur séparant deux maxima successifs de potentiel, l'un positif, l'autre négatif, soit de 50 m sur le circuit à haute tension : il pourra se faire que les deux points séparés par cette longueur de fil de 50 m soient dans la même galette de l'enroulement, c'est-à-dire relativement mal isolés l'un de l'autre. Sur l'enroulement à basse tension, au contraire, les deux points séparés par une distance de 50 m seront beaucoup plus éloignés, car la totalité de l'enroulement n'aura peut-être pas cette longueur. Les deux spires entre lesquels existe la différence de potentiel maxima seront donc beaucoup mieux isolés l'un de l'autre que dans le premier cas.

» Ceci fournit l'explication simple d'un phénomène resté longtemps mystérieux.

» Ayant nettement établi que les décharges inductives d'origine atmosphérique sont à haute fréquence et que, par conséquent, aucun appareil à distance explosive ou à résistance ohmique ne peut protéger le réseau, il nous reste à chercher quel est le para-foudre qui écoulera les décharges sans laisser passer le courant des machines, c'est-à-dire qui pourra rester constamment connecté aux conducteurs sans nécessiter l'emploi d'un éclateur quelconque.

» La solution est immédiate, le condensateur étant le seul appareil connu dont la résistance varie en raison inverse de la fréquence.

» Ce principe admis, la première question qui se pose sera de savoir quelle est la grandeur de la capacité qu'il conviendra d'employer pour obtenir une protection efficace.

» On doit tout d'abord remarquer qu'il n'y a aucune relation entre la grandeur de la capacité à adopter pour la batterie et la capacité totale de la ligne, car il ne s'agit pas d'oscillations libres.

» Il faut que cette batterie ait une capacité de même ordre que celle de la portion de la ligne correspondant à une demi-onde de l'oscillation forcée, transmise par les décharges. Ces oscillations étant comprises entre 100 000 et plus de 1 000 000 de périodes, les

demi-longueurs d'ondes correspondantes sont comprises entre 150 et 1500 m, et les capacités des lignes pour ces longueurs sont à peu près de 0,015 à 0,0015 mf. On voit donc combien sont petites les capacités des batteries nécessaires pour obtenir un effet utile.

» On pourrait se demander comment il se fait que d'aussi faibles capacités suffisent à l'obtention du résultat, mais on trouve la réponse immédiate à cette question en considérant que la solution consiste à mettre à l'entrée du poste une capacité sans self-induction concentrée en un point dont la valeur soit assez grande par rapport à la capacité de la portion de ligne intéressée par une demi-longueur d'onde de l'oscillation.

» On pourrait objecter que l'onde oscillatoire arrivant au point de branchement du condensateur y prendra un potentiel zéro, puis sera refoulée sur la ligne et créera un point de potentiel double à l'autre extrémité. Ceci est matériellement exact mais n'est pas dû à la présence du condensateur. Considérons en effet une ligne non munie de condensateurs et supposons qu'il se développe, en un point quelconque de sa longueur, une onde de haute fréquence. Cette onde se propagera à droite et à gauche du point où elle est créée, parviendra aux deux extrémités où elle rencontrera la self-induction énorme des appareils récepteurs ou générateurs. Une certaine partie du courant continuera son mouvement dans les enroulements en créant entre spires des différences de potentiel destructives; l'autre partie sera réfléchiée en arrière par l'influence de la self-induction des machines. Il y aura, en tous cas, doublement de l'onde aux deux extrémités, comme cela se produit à l'extrémité d'un tuyau acoustique fermé. Le fait d'intercaler entre le conducteur et la terre une résistance de quelques milliers d'ohms, même si elle est constamment branchée, ne produira aucun changement appréciable dans ces phénomènes; le fait de brancher une résistance en série avec une distance explosive produira encore moins d'effet, car la distance explosive ne fonctionnera pas du tout pour tous les phénomènes de tension inférieure à celle du réseau, bien que ceux-ci soient constamment dangereux. Donc, sans condensateur, on aura le doublement de l'onde aux deux extrémités; avec condensateur à un bout, on ne l'aura qu'à l'extrémité où ne se trouve pas de conden-

sateur. Avec condensateurs aux deux bouts, on n'aura de doublement de l'onde ni à une extrémité ni à l'autre.

» *Résumé.* — Les charges statiques étant, par définition même, des phénomènes à courant continu, il n'est pas contestable que les bobines de self-induction à noyau de fer qui écoulent ce genre de courant sans laisser passer le courant de la ligne sont les meilleures qu'on puisse employer.

» Il est certain, d'autre part, que les appareils à jets d'eau qui ont la même résistance d'écoulement pour les charges statiques et pour le courant du réseau sont peu rationnels. Ils ont un écoulement souvent insuffisant pour les charges statiques accidentelles et consomment beaucoup d'énergie d'une façon constante.

» Les appareils à fonctionnement discontinu, tels que ceux à cornes ou à rouleaux, n'entrent en jeu que quand le potentiel a déjà acquis une valeur dangereuse.

» Pour les autres phénomènes d'origine atmosphérique il faut d'abord déterminer s'ils sont à haute ou à basse fréquence.

» S'ils sont à haute fréquence, la différence de potentiel maxima de la décharge se trouvera appliquée entre deux fils très voisins de l'enroulement et l'on pourra par conséquent crever l'isolation de la machine ou du transformateur avec quelques centaines de volts. Si ces phénomènes sont à basse fréquence, la différence de potentiel se répartira sur tout l'enroulement et il faudra une tension égale à trois ou quatre fois celle de la machine pour amener un accident.

» Si l'on admet que les phénomènes sont à haute fréquence, comme tous les appareils à distance explosive ne fonctionnent qu'au-dessus de la tension du réseau, on voit que les phénomènes de tensions inférieures viendront crever les machines sans même que la distance explosive ait fonctionné.

» Pour cette raison, toute une catégorie d'appareils doit être écartée, mais il ne s'ensuivrait pas nécessairement que les condensateurs fussent efficaces.

» La théorie bien connue de la transmission des ondes le long d'une ligne et les formules employées aujourd'hui couramment par les télégraphistes et les téléphonistes permettent de calculer

l'action d'un condensateur branché en un point d'une ligne quand on connaît la fréquence du courant. Ces formules montrent que,

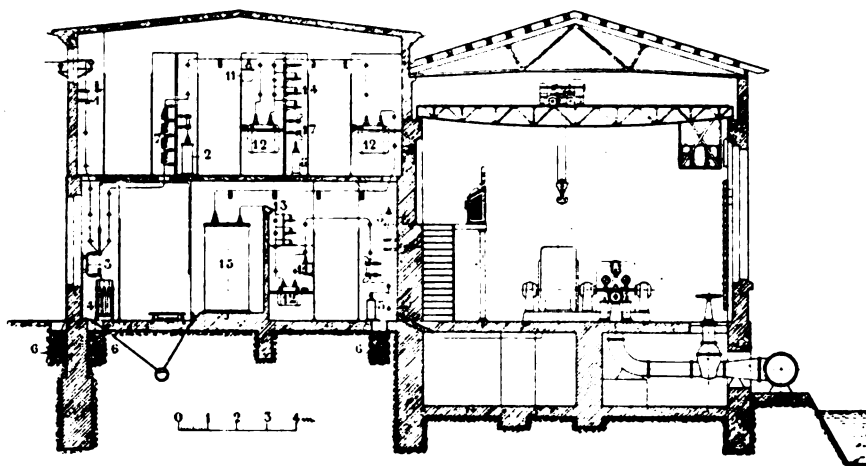


Fig. 3.

si la fréquence d'alimentation est plus grande que 50000 périodes, il suffit d'une très petite capacité pour réduire la tension au point de

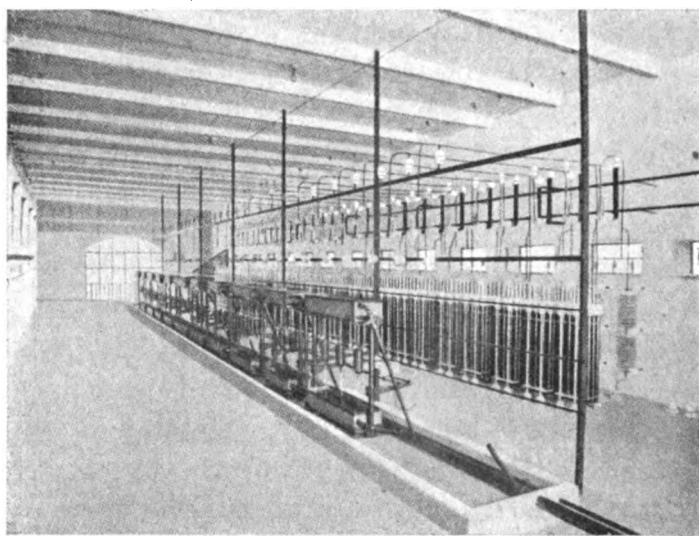


Fig. 4. — Compagnie Vaudoise des forces motrices du lac de Joux et de l'Orbe.
Usine de La Dornier (Suisse).

branchement du condensateur à 5 pour 100 et même à 10 pour 100 de sa valeur primitive.

» Le simple raisonnement nous montre qu'un condensateur étant assimilable à un réservoir à parois élastiques, si on le branche sur une conduite électrique, il remplira le même rôle de diminution de la pression qu'un réservoir à air branché sur une conduite hydraulique.

» L'emploi des condensateurs pour la protection des réseaux n'est pas nouveau, comme on le pourrait croire. René Thury a commencé à les employer il y a une dizaine d'années, et parmi ceux qu'il avait installés, certains sont encore en service. Si ceux-ci ne se sont pas répandus à ce moment, c'est qu'il n'était pas possible de les construire pour résister à des tensions de plus de 3 à 4000 volts.

» Le modèle préconisé par Moscicki ayant permis d'atteindre pratiquement des tensions de 50 000 volts, l'usage de ces appareils s'est répandu de plus en plus et, en cinq ans environ, 6000 batteries de protection ont été installées.

» Dans la plupart des cas, ces batteries ont été placées dans des parties particulièrement exposées aux orages où les appareils existants n'avaient pas donné satisfaction.

SURTENSIONS D'ORIGINE INTÉRIEURE.

» On peut classer les surtensions d'origine intérieure de la façon suivante :

» 1. *Les surtensions qui sont dues aux constantes mêmes du réseau*, c'est-à-dire aux self-inductions et aux capacités qui sont en jeu dans les machines et dans les câbles à un moment donné. Ce sont les phénomènes de résonance qui peuvent eux-mêmes être permanents ou accidentels. Ces phénomènes ne sont dus à aucune action extérieure.

» Si ces phénomènes sont accidentels, on pourra toujours en éviter les effets par des limiteurs de tension convenablement calculés: s'ils sont permanents, il n'y aura d'autre solution que de changer les constantes du réseau ou des machines, car on ne peut admettre qu'on doive absorber constamment dans les appareils de protection une partie de l'énergie de la centrale.

» On peut noter toutefois que, même en cas de résonances accidentelles, l'ensemble des limiteurs de tension disposés sur un réseau un peu étendu ne devra avoir que quelques ohms de résistance si l'on veut éviter les effets destructifs.

» 2. *Les surtensions qui sont dues à des défauts se produisant sur le réseau*, tels que mise à la terre par un isolateur ou un câble claqué, c'est-à-dire à des accidents d'exploitation.

» Sauf les cas exceptionnels où l'on rencontre les conditions de résonance, il n'y a production de tensions élevées qu'au moment précis où le défaut se produit, ou encore au moment où celui-ci disparaît. On obtiendra un effet utile en disposant des limiteurs de tension ayant un grand débit, même si ceux-ci n'ont pas une capacité calorifique élevée.

» 3. *Les surtensions qui sont dues aux variations brusques de régime*, telles que la rupture d'une forte charge ou d'un court circuit par un automatique ou un changement très rapide de la charge, comme il s'en produit quand des moteurs de quelques milliers de chevaux conduisent des trains de laminoirs. Ces phénomènes sont dus à des causes normales d'exploitation.

» C'est le cas le plus général et nous allons l'examiner en détail.

» Il faut commencer par expliquer exactement comment et à quel endroit les surtensions peuvent se produire.

» Considérons (*fig. 5*) un enroulement d'alternateur A ayant

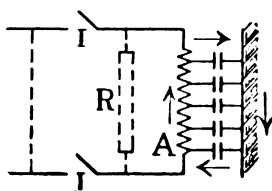


Fig. 5.

une self-induction et une capacité uniformément réparties vis-à-vis de la terre : soit II un interrupteur automatique à huile. Supposons que l'alternateur alimente une ligne sur laquelle vient se produire un court-circuit en A. A ce moment, l'alternateur débitera sur le court-circuit un courant égal à plusieurs fois son courant normal. Désignons par L la self-induction de l'alternateur, par I le

courant normal et par I_0 le courant du court-circuit; l'énergie emmagasinée dans l'intérieur du bobinage sera

$$\frac{LI^2}{2}.$$

» Si l'interrupteur automatique coupe brusquement le circuit, cette quantité d'énergie n'aura pas le temps de s'écouler par la ligne, et il se produira une surtension, car le seul chemin d'écoulement ouvert sera celui formé par la capacité de la machine elle-même. L'écoulement se produira donc suivant la direction des flèches.

» La surtension maxima résultante aura la forme connue $I_0 \sqrt{\frac{L}{c}}$.

» Supposons maintenant qu'on intercale en dérivation une résistance R .

» L'énergie emmagasinée dans le bobinage de l'alternateur pourra s'écouler suivant deux chemins parallèles :

» *a.* Par la capacité de la machine vis-à-vis de la terre,

» *b.* Par la résistance R .

» L'enroulement de la machine a une capacité et une self-induction uniformément réparties, c'est-à-dire que, sauf la valeur de ces constantes, elle est identique à une ligne quelconque.

» On sait que, quand une onde se propage au travers d'une ligne ayant une capacité et une self-induction uniformément réparties, le rapport entre la force électromotrice et l'intensité est égale à $\sqrt{\frac{L}{c}}$.

» Si l'on veut se rendre compte de la diminution de surtensions amenée par l'introduction d'une résistance R en dérivation il n'y a qu'à calculer la résistance équivalente des deux chemins d'écoulement placés en parallèle. On peut faire différentes hypothèses sur le décalage des deux courants passant par la résistance et par l'enroulement de la machine.

» Si on les suppose en phase, on trouvera pour la résistance équivalente la valeur

$$\frac{R \sqrt{\frac{L}{c}}}{R + \sqrt{\frac{L}{c}}}.$$

» Si on les suppose décalés de 90° on trouvera

$$\frac{R\sqrt{\frac{L}{c}}}{\frac{R^2}{\sqrt{\frac{L}{c}}} + \sqrt{\frac{L}{c}}},$$

et les surtensions correspondantes pourront s'écrire :

$$I_0\sqrt{\frac{L}{c}} \frac{R}{R + \sqrt{\frac{L}{c}}} \quad \text{ou} \quad I_0\sqrt{\frac{L}{c}} \frac{R}{\frac{R^2}{\sqrt{\frac{L}{c}}} + \sqrt{\frac{L}{c}}},$$

ce qui donnera, pour valeur du coefficient de réduction par rapport à la surtension maximum :

$$\frac{R}{R + \sqrt{\frac{L}{c}}} \quad \text{et} \quad \frac{R}{\frac{R^2}{\sqrt{\frac{L}{c}}} + \sqrt{\frac{L}{c}}}.$$

» Pour calculer la valeur à donner à la résistance du limiteur, il suffira donc de connaître la valeur de $\sqrt{\frac{L}{c}}$ et la valeur du courant de court-circuit I_0 .

» En moyenne, dans les alternateurs, la valeur de $\sqrt{\frac{L}{c}}$ est voisine de $\frac{50000}{I}$, I étant le courant normal de la machine. Si, par exemple, on prend $I = 100$ ampères, on aura $\sqrt{\frac{L}{c}} = 500$. Si l'on admet que la résistance équivalente du limiteur est de 250 ohms, on aura, pour le coefficient de diminution de la surtension, soit 0,33, soit 0,40, suivant qu'on appliquera une formule ou l'autre. Pratiquement ces résultats sont identiques, car il ne s'agit nullement d'éviter des surtensions de 10 à 20 pour 100 de la tension normale, mais bien d'empêcher des phénomènes violents dont la tension atteint quelquefois 100 000 à 200 000 volts.

» On voit, par cet exemple, que, si l'on met de grandes résistances, l'appareil est inefficace. D'autre part, si l'on met de faibles résistances, il peut créer, par son fonctionnement même, des surtensions et des résonances qui le rendent dangereux. Il faut, en effet,

que la résistance R du limiteur soit liée aux self-inductions et aux capacités en jeu par la formule

$$R > 2\sqrt{\frac{L}{C}}.$$

» On sait depuis longtemps que, sur les conduites hydrauliques, pour qu'une soupape de décharge soit efficace, il faut qu'elle ait une section comparable à la section de la conduite elle-même, faute de quoi elle est incapable d'éviter les coups de bélier qui se produisent à la fermeture brusque d'une vanne. Il en est absolument de même sur les canalisations électriques.

» Prenons le cas d'un alternateur triphasé de 1000 kv-A à 10000 volts. Cette machine aura un débit normal de 58 ampères avec un voltage de 5800 volts entre chaque phase et la terre, c'est-à-dire que la résistance équivalente ou impédance du réseau sera de $\frac{5800}{58} = 100$ ohms. Quand il se produit un court-circuit sur le réseau, l'intensité est multipliée par 3 environ et l'impédance correspondante tombe à 33 ohms quand le régime du court-circuit est établi.

» On se trouve alors dans le cas de la figure 6, où une pompe

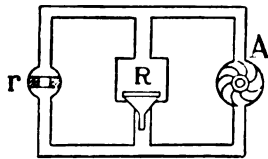


Fig. 6.

centrifuge A débite sur une conduite munie d'un robinet r ayant une section égale à $\frac{1}{33}$. Si l'on ferme instantanément r , il se produit un coup de bélier et, pour l'éviter, on propose de placer en dérivation sur la conduite une soupape R ayant une section de $\frac{1}{2000}$. Il est évident que cette soupape sera insuffisante pour éviter les coups de bélier provenant de l'arrêt brusque de la colonne d'eau au moment de la fermeture du robinet r .

» Pour arriver au résultat visé il faudra que la section de la soupape R soit comparable à celle du robinet r .

» Il en est absolument de même avec un circuit électrique où

l'on aura remplacé la pompe centrifuge A par un alternateur, le robinet R par un court-circuit coupé par un automatique, et la soupape hydraulique R par une soupape électrique.

» En outre, la simple réflexion nous fait comprendre que, si la soupape R a une grande section, sa fermeture brusque amènera de nouveaux coups de béliet et que, de plus, il pourra s'y produire des oscillations de la colonne liquide.

» Il y a un moyen simple d'éviter ces inconvénients : nous constituerons notre soupape, comme il est indiqué sur la figure 7,

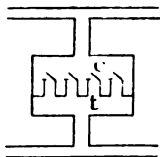


Fig. 7.

au moyen d'un appareil formé d'une série de tuyaux capillaires *t* dont chacun est fermé par un clapet indépendant *c*. La résistance de chacun des tuyaux sera telle que la colonne liquide qui y circule ne pourra prendre de mouvement oscillatoire. Dans ces conditions, il est bien évident que l'ensemble des colonnes n'en aura pas. On pourra mettre en parallèle assez de colonnes pour avoir un débit aussi grand que celui qu'on obtenait avec la soupape unique à grande section.

» Le fonctionnement sera le suivant : quand un coup de béliet surviendra, les petits clapets s'ouvriront les uns après les autres, débitant chacun pour leur compte jusqu'à ce que la section totale offerte au passage du liquide soit suffisante pour empêcher la pression de dépasser une certaine limite. La force vive du coup de béliet sera absorbée par la résistance de frottement des tuyaux, les petits clapets se fermeront les uns après les autres.

» L'appareil électrique pour l'écoulement des surtensions sera construit exactement de la même façon.

» Chacun des tuyaux capillaires, ayant une résistance de frottement assez grande pour éviter les oscillations de la colonne d'eau, sera remplacé par une résistance ohmique assez grande pour éviter les oscillations électriques. Chacun des clapets fermant les tuyaux sera remplacé par une distance explosive.

» L'appareil prend alors la disposition schématique indiquée dans la figure 8.

» Nous avons exposé le premier principe de fonctionnement, mais ce n'est pas le seul, car, pour avoir une marche du limiteur conforme à la théorie, il faut que dans chaque colonne le petit

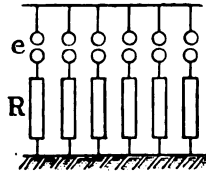


Fig. 8.

clapet se ferme au moment où la pression baisse en dessous de la limite de réglage. De même, il faut que l'étincelle de chaque éclateur s'éteigne aussitôt que la tension baisse même faiblement.

» Il faut également que le limiteur entre en fonction pour une tension peu supérieure à la tension normale.

» Nous avons obtenu ces résultats en adoptant pour chaque colonne de l'appareil la disposition représentée par la figure 9.

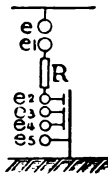


Fig. 9.

Entre e , e_1 , e_2 , e_3 , ... se trouvent des distances explosives. R est une résistance ohmique convenablement calculée. Les électrodes e_2 , e_3 , e_4 , sont reliées à la terre par l'intermédiaire de petits condensateurs; e_5 est connecté directement à la terre. La boule e est reliée directement au conducteur. Avant le fonctionnement, e est au potentiel de la ligne, tandis que e_1 , e_2 , e_3 , e_4 , e_5 sont maintenus au potentiel de la terre, soit par l'intermédiaire des petits condensateurs, soit directement.

» Supposons maintenant que, la terre étant au potentiel zéro et la ligne du potentiel 10000, la distance explosive $e - e_1$ soit réglée pour fonctionner à 12000 volts.

» Lorsqu'une surtension atteignant 12000 volts se produira,

la boule e se mettra à 12000 volts, tandis que e_1 sera au potentiel zéro; il sautera donc une petite étincelle entre e et e_1 ; cette étincelle correspondra seulement au très petit courant pouvant passer à travers les condensateurs. Il en résultera que e_1 se mettra au même potentiel que e , moins toutefois la chute de tension dans l'étincelle e, e_1 . Si l'on estime que cette chute de tension est de 500 volts, e_1 se mettra au potentiel $12000 - 500 = 11500$ volts. Il en sera de même de e_2 , qui est relié directement à e_1 par une résistance de valeur insignifiante pour le petit courant traversant les condensateurs. Donc, à ce moment, e_2 sera à 11500 volts et e_3 au potentiel zéro par l'intermédiaire du petit condensateur. Il sautera donc une étincelle entre e_2 et e_3 , et e_3 se mettra à $11500 - 500 = 11000$ volts. Il amorcera ensuite une étincelle entre e_3 et e_1 , puis finalement entre e_1 et e_3 . A ce moment, le courant de surtension pourra s'écouler librement du conducteur à la terre en traversant la résistance et toutes les distances explosives en série.

» Pratiquement, l'appareil complet est constitué comme le représente la figure 10.

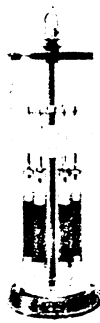


Fig. 10.

» Le limiteur est formé de 6, 8 ou 12 colonnes en parallèle ayant, suivant les cas, des résistances individuelles de 800 à 2500 ohms, ce qui fait que certaines de ces soupapes ont des résistances de 70 ohms. Dans certains cas particuliers, cette faible résistance est encore trop forte et il faut disposer plusieurs appareils en parallèle.

» Le premier éclateur, situé à la partie supérieure de l'appareil,

est réglable au moyen d'une vis à pas millimétrique de façon à adapter la distance explosive à la tension de l'installation. Il est enfermé dans un petit cylindre en verre qui le met à l'abri des poussières. Le réglage peut se faire d'une façon précise. Les autres distances explosives sont fixes et, comme elles sont formées par des rondelles, elles ont un développement considérable atteignant 190 mm. Il résulte de cette disposition que les étincelles se produisent toujours entre des surfaces froides, ce qui amène leur extinction immédiate sans aucun soufflage. Les condensateurs sont situés à l'intérieur de la colonne.

» En résumé, l'appareil que nous avons étudié pour résoudre le problème des surtensions d'origine intérieure présente les caractéristiques suivantes :

» 1^o Il permet d'obtenir des résistances équivalentes d'écoulement aussi basses qu'il est nécessaire sans produire par son fonctionnement lui-même, des surtensions ou des résonances.

» 2^o Il donne l'extinction assurée des étincelles amorcées par la surtension au bout d'une demi-période du courant des machines, ainsi que le montrent d'ailleurs les courbes d'oscillographe reproduites sur la figure 11.

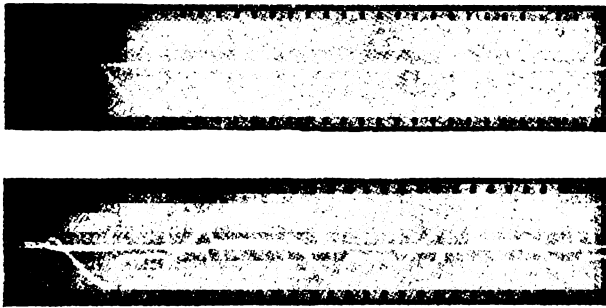


Fig. 11.

» Ces extinctions assurées au bout d'une demi-période ont permis de constituer des résistances ne contenant que quelques grammes de métal, car l'énergie à écouler (qui est celle contenue à l'état potentiel dans le circuit) ne représente jamais qu'une fraction de calorie et l'important est de l'absorber sans laisser passer pendant un temps appréciable le courant du réseau.

» Avec les appareils à soufflage, au contraire, on laisse passer pendant plusieurs secondes ou plusieurs centaines de demi-périodes le courant du réseau : cette énergie représente des dizaines de calories, ce qui force à mettre sans utilité des résistances lourdes et encombrantes, qui sont d'ailleurs incapables d'écouler les surtensions à cause de leur trop forte résistance.

» C'est pour les raisons exposées ci-dessus que nos résistances ne brûlent pas, malgré leur faible poids. Les fusibles disposés sur chaque colonne ne fondent qu'en cas de perforation du diélectrique mais jamais par le passage d'une surtension.

» La soupape s'amorce pour des tensions plus petites que celles qui sont nécessaires à n'importe quel autre appareil. En effet, le dispositif spécial d'amorçage fait qu'on dispose de la presque totalité de la tension du réseau pour amorcer séparément chacune des distances explosives.

» Nous avons vérifié, par exemple, qu'au lieu de 10000 volts pour amorcer un certain nombre d'étincelles en série, il en fallait 50000 dès qu'on retirait les petits condensateurs.

SURINTENSITÉS.

» Quand on réunit en court-circuit les bornes d'un alternateur et qu'après lui avoir donné sa pleine excitation, on le fait tourner à sa vitesse, on constate que le débit est égal à deux fois et demie ou trois fois le courant normal.

» Il est évident que, dans cette expérience, la tension résultante est réduite à zéro, et ceci est dû à deux causes.

» En premier lieu, l'alternateur fonctionne sous un décalage zéro, et, au moment du maximum du courant, les ampères-tours induits sont opposés aux ampères-tours inducteurs. Le flux qui passe dans le circuit magnétique n'est alors déterminé que par leur différence. Si, par exemple, il y a en régime normal trois fois plus d'ampères-tours sur l'inducteur que sur l'induit, il suffira que le débit triple pour qu'il y ait égalité entre ces deux nombres et, par conséquent, pour que le flux et la tension de la machine soient annulés.

» En second lieu une certaine force électromotrice est nécessaire

pour surmonter la self-induction de l'induit, c'est-à-dire le flux qui se ferme autour du bobinage sans couper le circuit inducteur.

» On voit donc qu'en définitive tout se règle de façon que la différence des ampères-tours inducteurs et induits soit suffisante pour créer un flux assez grand pour engendrer une force électromotrice capable de vaincre la self-induction de la machine.

» Cette force électromotrice de self-induction n'est guère en moyenne que 3 à 5 pour 100 de la tension normale.

» Il en va tout autrement quand on produit brusquement un court-circuit sur un alternateur alimentant un réseau de distribution. Au moment de ce court-circuit, des ampères-tours supplémentaires sont bien créés dans l'induit et tendent à démagnétiser l'inducteur, mais cette démagnétisation ne peut se produire que lentement. Au premier instant du court-circuit, la force électromotrice normale de l'alternateur doit donc être entièrement absorbée par la self-induction de l'induit. Si celle-ci n'est, avec le courant normal, que 3 pour 100 de la tension, le débit devra atteindre 33 fois sa valeur primitive pour qu'il y ait équilibre.

» Peu à peu, ensuite, la démagnétisation de l'inducteur se produira et au bout d'un temps plus ou moins long, l'intensité reviendra à sa valeur de régime, c'est-à-dire 2,5 ou 3 fois le débit normal.

» Ces phénomènes ont été mis très nettement en lumière par M. Miles Walker dans une conférence donnée par lui à l'Association des Ingénieurs électriciens anglais, en mars 1910. Les courbes d'oscillographe qu'il a produites montrent qu'il faut 20, 30 secondes et davantage pour que l'intensité revienne à la valeur du régime.

» On voit de suite quels sont les accidents qui peuvent résulter de courts-circuits atteignant 30 fois le courant normal et se produisant dans des centrales de plusieurs milliers de kilowatts. Les efforts développés croissant comme le carré du courant, les connexions latérales des alternateurs sont souvent déformées; les barres omnibus sont arrachées de leurs supports et viennent se coller l'une contre l'autre; les interrupteurs automatiques, incapables d'assurer la rupture de semblables intensités, fondent; les isolateurs des lignes crèvent, etc.

» Ces phénomènes sont surtout devenus sensibles depuis l'emploi de plus en plus étendu des turbo-alternateurs car, outre l'augmentation de puissance des unités qui est résulté de leur extension, ce genre de machines a une self-induction très faible. On a commencé par apprécier cette qualité, qui diminuait les chutes de tension, mais nous croyons que c'est à tort.

» En effet, dans les grandes centrales ces chutes de tension n'ont pas beaucoup d'importance car, même de grandes variations de charge ont peu d'influence sur l'ensemble des machines en service.*

» Il y a donc grand intérêt à augmenter intentionnellement la self-induction des alternateurs de façon à diminuer en même temps la violence du court-circuit. La meilleure machine, à ce point de vue, serait une machine ayant très peu d'ampères-tours induits par rapport au nombre d'ampères-tours inducteurs de façon que la chute de tension ne provienne pas de la démagnétisation des pôles. Au contraire, la self-induction devrait être assez grande pour qu'au moment d'un court-circuit l'intensité ne dépasse pas 5 à 6 fois la valeur de régime. De cette façon les efforts développés ne seraient que 25 fois les normaux au lieu de 900 fois, comme dans le cas examiné précédemment. On ne peut arriver à ce résultat qu'en mettant en dehors de la machine des self-inductions sans noyau de fer spécialement calculés pour chaque alternateur.

» *Destruction des isolants par l'ozonisation.* — Les bobinages des alternateurs et transformateurs devront être construits de telle sorte qu'il ne puisse s'y produire d'ozone.

» On a une tendance à croire que les tensions de 3000 à 10000 volts ne sont pas dangereuses pour les enroulements d'alternateurs, mais c'est là une erreur grossière. Avec quelques milliers de volts seulement, des éffluves, se produisant entre les fils isolés et les parois des gouttières en micanite appliquées contre le bâti des machines, engendrent de l'ozone; ce gaz oxyde rapidement les isolations en coton, les brûle, et des court-circuits de fil à fil se produisent.

» Il en est absolument de même dans les transformateurs à l'air

libre. Le seul moyen pratique d'éviter ces inconvénients est de chasser complètement l'air contenu dans les bobinages.

» S'il s'agit de générateurs, on devra exiger que tous les fils des bobines soient noyés dans une matière isolante compacte de telle sorte que si l'on scie une de ces bobines sa section se présente sous l'aspect d'un câble.

» On adoptera de même des transformateurs à l'huile, cette huile étant parfaitement exempte d'air et d'eau.

M. GROSSELIN. — « Je me déclare d'abord tout à fait partisan de chercher, pour la protection des réseaux, autre chose que ce qui existe généralement.

» Nous ne sommes pas satisfaits de nos serviteurs, changeons-les. Nous changerons tout au moins de défauts, et cela repose.

» Il est certain que les limiteurs à cornes, à cylindres, à jet d'eau, ont le très grave inconvénient de livrer passage, lorsqu'ils fonctionnent, au courant de ligne.

» Une résistance, de masse trop faible, court-circuite alors les bornes; elle est bientôt détruite, comme M. Legouéz nous l'a montré par de nombreux exemples.

» Je crois toutefois que, si nous avons beaucoup à attendre des condensateurs, il faut se garder d'exagérer et de présenter l'antique bouteille de Leyde comme on ferait d'une fiole pharmaceutique pour guérir tous les maux des canalisations.

» Le condensateur est du reste un appareil qui, malgré sa figure plutôt prosaïque, paraît avoir, de tout temps, échauffé les imaginations.

» En 1880, époque qui peut être traitée de préhistorique, et qui appartient à coup sûr aux âges héroïques de l'électricité industrielle, Jablochkoff allumait ses fameuses bougies dans un circuit de courant alternatif.

» Il observa que l'introduction des condensateurs dans son circuit en améliorait le fonctionnement.

» Il avait, sans doute, à cette époque lointaine, des idées un peu générales sur les rôles joués par la self et par la capacité; toujours est-il que, pour ne pas rester à court d'explication, ce qui est la disgrâce suprême pour un inventeur, il donna la suivante :

» Le condensateur jouirait de la mystérieuse propriété de puiser dans l'atmosphère l'électricité ambiante, pour l'introduire, à titre gracieux, dans les circuits des électriciens.

» Vous voyez donc que déjà s'esquissaient les affinités du condensateur pour les décharges atmosphériques.

» C'est par des raisonnements infiniment plus sérieux que M. Giles justifie les résultats pratiques donnés par ces appareils.

» Il me permettra cependant une légère critique au sujet de sa soupape.

» Peut-être a-t-il pour elle une indulgence de père.

» J'avoue, pour ma part, ne pas voir bien clairement ce qui la différencie d'un limiteur ordinaire à cylindres.

» Sans doute, chacun des cylindres, sauf le dernier, est muni d'une capacité par rapport à la terre. Mais les cylindres d'un limiteur ordinaire ont, eux aussi, une capacité, quoique moins grande.

» Il est bien connu que les premiers cylindres du côté de la ligne donnent constamment des étincelles. M. David a remarqué que les étincelles continuent à se produire entre les deux premiers cylindres, même si le premier est laissé hors circuit.

» Ce sont donc bien des phénomènes de capacité et M. Giles aurait obtenu le même résultat s'il avait augmenté les dimensions des cylindres.

» Peut-être l'insertion des condensateurs a-t-elle une influence sur l'amorçage de l'arc. Mais lorsque l'étincelle a jailli sur toute la longueur du limiteur à soupapes, elle joue le même rôle que dans les limiteurs à cylindres.

» En fait, les expériences de Schrottke relatées dans l'*Elektrotechnische Zeitschrift*, ont montré que les soupapes se comportent, en fait, comme des limiteurs à cylindres.

» Je reconnais que M. Giles ne propose ses soupapes que pour la protection des canalisations entièrement souterraines. Mais je crois, avec la très grande majorité des exploitants et des fabricants de câbles, que les réseaux souterrains n'ont besoin d'aucune protection spéciale, pourvu qu'ils aient été essayés à l'usine au triple de la tension normale; à plus forte raison, s'ils l'ont été en pointe au quadruple.

» Pour conclure, je crois que l'expérience seule doit se prononcer dans ces questions complexes.

» Or l'expérience nous apprend :

» D'abord que, pour la protection des lignes aériennes, les limiteurs à cylindres, à cornes, à filets d'eau, ont souvent de graves inconvénients : continuons donc à essayer les condensateurs qui donnent déjà des résultats meilleurs; tendons des fils protecteurs au-dessus des lignes pour les protéger contre les inductions statiques.

» Pour les lignes souterraines, l'expérience nous apprend encore que les coefficients de sécurité adoptés à l'heure actuelle suffisent à assurer une exploitation tranquille : renforçons, s'il est besoin, certains isolants encore insuffisants; mettons des bobines de self et peut-être même des condensateurs simples pour barrer la route aux oscillations de haute fréquence ou les absorber au passage, mais attendons une expérience plus longue pour adopter les soupapes qui sont des limiteurs à cylindres déguisés et qui présentent l'inconvénient de la présence d'éclateurs, pères des oscillations dangereuses. »

M. BOUCHEROT. — « Messieurs, je pense qu'il y a quelques réserves à faire sur la partie théorique de l'intéressante communication de M. Giles.

» Nous sommes probablement nombreux à admettre que les décharges atmosphériques ont le caractère oscillatoire et de très haute fréquence; mais il n'est pas mauvais de rappeler de temps en temps qu'il faut se garder d'appliquer *de plano* les raisonnements qui nous sont familiers pour les basses fréquences industrielles à ces très hautes fréquences, à cause du rayonnement d'énergie.

» Je laisserai de côté la question de savoir s'il est légitime d'assimiler un conducteur de longueur quelconque à self-inductance et capacité uniformément réparties à une impédance $\sqrt{\frac{L_1}{C_1}}$ ⁽¹⁾. Il y a une question préalable :

⁽¹⁾ Les formules connues de l'impédance d'un conducteur de longueur X à self-inductance uniformément répartie, L_1 , par unité de longueur, et à capacité uniformément

» Si l'on veut tenir compte, pour les fréquences élevées, de la capacité répartie entre l'enroulement d'induit d'un alternateur et la masse, il faut également tenir compte de la capacité entre fils de cet enroulement, *qui est du même ordre de grandeur et peut modifier complètement, non seulement les résultats numériques, mais la forme physique des phénomènes*. L'étude est alors très compliquée, mais, pour concevoir simplement combien cette autre capacité peut arriver à *renverser* les résultats, on peut faire, en première approximation, une hypothèse simple consistant à admettre que les éléments de la self-inductance répartie uniformément sont shuntés par des éléments de capacité. On comprend alors que, pour certaines fréquences, il peut y avoir annulation et changement de signe de la self-inductance répartie. Que devient alors $\sqrt{\frac{L_1}{C_1}}$ (1) ?

» Ma remarque est uniquement d'ordre théorique et ne tend aucunement à déprécier la valeur des condensateurs Moscicki, dont je n'ai entendu dire que du bien.

» Au sujet de la mise en court-circuit brusque des gros alter-

répartie, C_1 , par unité de longueur, sont, par exemple,

$$Z = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} \cotg(\omega \sqrt{L_1 C_1} X)$$

pour un conducteur ouvert, et

$$Z = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} \tng(\omega \sqrt{L_1 C_1} X)$$

pour un conducteur fermé, quand on néglige la résistance.

(1) Voici comment peut se résumer, en première approximation, l'influence en question :

Lorsqu'il y a seulement self-inductance et capacité réparties, si la fréquence croît de zéro à l'infini, la réactance, pour un conducteur de longueur déterminée, ouvert par exemple, passe de $-\infty$ à $+\infty$ une infinité de fois; ceci exprime, sous une autre forme, cette curieuse propriété, que M. Brylinski nous a fait connaître, que, s'il y a un alternateur à une extrémité, il y a une infinité de fréquences de résonance.

Mais si l'on suppose une nouvelle capacité répartie parallèlement à la self-inductance, en dérivation sur celle-ci, la réactance passe de $-\infty$ à $+\infty$ une infinité de fois dans une zone de variations de fréquence *finie* et très étroite, par exemple entre $0,95 f_1$ et f_1 , si f_1 est la fréquence de résonance des éléments de self-inductance et de capacité en parallèle. L'allure des phénomènes est donc tout à fait différente; mais il n'y a pas lieu de développer ceci dans les circonstances actuelles, car ce qui se passe est en réalité encore plus compliqué.

nateurs, la communication faite par M. Miles Walker à l' « Institution of Electrical Engineers » est du plus grand intérêt et représente un gros travail de haute valeur. Cependant je me permettrai de dire que je suis en désaccord sur quelques points avec l'auteur. J'ai étudié la question assez sérieusement au point de vue analytique en m'appuyant sur de nombreux résultats d'expérience qui m'ont été confiés. Au premier abord ces résultats de l'expérience sont quelque peu rébarbatifs; avec quelque patience on arrive néanmoins à les expliquer et à établir des formules permettant de calculer assez rapidement ce qu'il est utile de connaître pour le cas d'un alternateur quelconque.

» L'exposé de la question dépasserait évidemment le cadre des simples observations pour lesquelles j'ai demandé la parole. »

M. GILES. — « Messieurs, je voudrais répondre un mot à M. Grosselin qui ne semble pas avoir bien compris mes explications. Peut-être aussi, n'ai-je pas été suffisamment clair.

» Je n'insisterai pas sur l'expression de *système de protection avec condensateur en série*, qui a échappé à M. Grosselin, et qui est la négation même du système de protection que nous préconisons. Il ne faut dans le circuit ni résistance ohmique, ni self-induction; il n'est pas logique, en effet, de prendre des soins considérables pour réduire à 10 ou 15 ohms la résistance des plaques de terre pour ensuite les grouper en série avec des résistances de plusieurs milliers d'ohms.

» En ce qui concerne la soupape, nous l'avons différenciée d'un mot du limiteur de tension, en disant que, si l'on retire les condensateurs d'amorçage, elle ne commence plus à fonctionner que pour une différence de potentiel cinq fois plus grande que celle obtenue avec la tension normale. Ceci est précisément dû à ce qu'on a transformé cette soupape en limiteur ordinaire.

» Remarquons pourtant que, sans condensateur, du fait même de sa construction, l'élément de soupape a des capacités entre électrodes beaucoup plus grandes qu'un limiteur, tel que ceux qu'on trouve aujourd'hui sur le marché.

Il s'agit là d'une simple constatation matérielle qui ne laisse

place à aucune discussion, et j'offre à M. Grosselin les moyens de vérifier le fait par lui-même.

» Si nous voulons nous rendre compte des raisons qui expliquent ces différences de fonctionnement, examinons un limiteur à rouleaux quelconque. Pour amorcer chacune des distances explosives, on ne disposera que d'une faible partie du voltage total. D'autre part, le nombre des rouleaux se trouvera déterminé par la condition d'avoir un amortissement suffisant pour assurer l'extinction de l'étincelle au bout d'une demi-période. Pratiquement, le nombre de rouleaux, ainsi déterminé, est toujours tel que, pour obtenir le fonctionnement, on doit admettre des surtensions considérables pour supporter une tension normale.

» Avec le montage indiqué par nous, le fonctionnement est tout différent. Au début du fonctionnement, les éclateurs e , e_1 , e_2 , ... (fig. 9) sont au potentiel zéro et l'on dispose, pour amorcer la première distance explosive, de la tension totale. Quand la première étincelle a jailli, e_1 se met au potentiel de e moins la chute de tension dans cette étincelle. A ce moment e_2 , ... sont encore au potentiel zéro et l'on dispose d'une différence de potentiel élevée pour amorcer les distances explosives suivantes, etc.

» La distance ee_1 est réglée pour la tension du réseau. Les distances suivantes sont, au contraire, fixes et de l'ordre de 1 à 2 mm. Il résulte de ceci que, pratiquement, on peut amorcer avec une tension déterminée cinq à six fois plus d'étincelles qu'avec le dispositif ordinaire. Tous les constructeurs ont bien essayé de modifier dans ce sens leurs limiteurs de tension par l'adjonction de résistances branchées en différents points de la série de distances explosives, mais sans obtenir un résultat suffisant.

» Nous croyons avoir montré ainsi toute la différence existant entre les deux montages. Quant à la remarque de M. Grosselin, concernant les démonstrations faites par M. Schrottke, nous donnerons quelques explications à ce sujet.

» M. Schrottke est ingénieur en chef d'un des services de Siemens et Schuckert, et de plus l'inventeur des parafoudres à cornes. Nous avons vendu environ 1500 appareils en Allemagne et, comme c'était généralement pour remplacer des parafoudres à cornes, cela n'a pu faire aucun plaisir à M. Schrottke. A la suite d'une

conférence que nous avons donnée à Essen par l'intermédiaire d'un ingénieur allemand, il a publié dans l'*E. T. Z.* une série d'articles avec descriptions d'expériences faites dans le laboratoire de Siemens et qui tendaient à prouver que seuls ses appareils étaient bons et que les nôtres étaient sans aucune valeur. Il s'agit là en somme d'une controverse commerciale qui n'a rien à voir ici.

» Concernant la question des accidents sur les réseaux, je suis moins optimiste que M. Grosselin. J'ai eu l'occasion de visiter de nombreux réseaux de câbles en Allemagne, dont quelques-uns comprennent 200 à 300 km de canalisation. Il ne se passe pour ainsi dire pas de jour sans qu'il y ait un accident quelconque, soit aux câbles, soit aux interrupteurs, soit aux machines. A Paris il en est de même, et, dans un récent numéro du *Bulletin*, on peut trouver la description complète d'un accident grave survenu dans une centrale que nous connaissons tous. Dans la même usine, il y en a eu bien d'autres, et ce n'est pas la seule. Tout le monde étant fixé sur ce point, je n'insisterai pas davantage.

» Je citerai toutefois un exemple de surtension contrôlé par moi. Il s'agit d'un moteur de 2000 chevaux conduisant un laminoir dans une usine métallurgique du Luxembourg. Le moteur était muni d'un parafoudre à cornes, avec résistance d'environ 2000 ohms, et il y avait des brûlures de bobines environ toutes les trois semaines d'où chômage de 200 ouvriers pendant plusieurs jours. On a installé des soupapes composées chacune de 6 éléments ayant par élément une résistance de 1800 ohms, donc résistance équivalente de 300 ohms par appareil; les accidents ont continué.

» On a ensuite doublé l'installation avec 12 éléments en parallèle, soit résistance équivalente de 150 ohms; les accidents sont devenus moins fréquents. Enfin, on a modifié l'appareil en mettant 12 éléments comprenant chacun une résistance de 800 ohms, soit une résistance équivalente de 67 ohms: les accidents ont cessé et, depuis 18 mois, le fonctionnement de l'installation est satisfaisant. Si l'on avait voulu obtenir le même résultat avec des limiteurs à rouleaux, il aurait fallu en mettre 12 en parallèle, par conducteur, ce qui aurait sans doute été plus encombrant et plus coûteux que l'unique appareil de la figure 10.

» Les formules que nous avons trouvées après coup montrent

que c'est bien environ 70 ohms qu'il fallait dans ce cas particulier, et nous avons continué à appliquer ces formules bien qu'elles ne soient qu'approximatives.

» En résumé, il faut, d'après nous, avoir un limiteur de tension composé d'éléments parallèles tels que chacun d'eux ait une résistance ohmique suffisante pour éviter une oscillation que craint M. Grosselin, ces éléments étant en assez grand nombre pour que leur ensemble puisse écouler une surtension.

» Nous aurions tort de nous vanter d'être arrivé à une déduction aussi simple et d'avoir trouvé l'appareil réalisant les conditions que nous nous étions posées à l'avance : il nous a fallu quatre ans de travail pour arriver au résultat, et c'est un temps bien long pour mettre au point une chose aussi simple.

» En ce qui concerne les observations de M. Boucherot, elles semblent nous reprocher de vouloir appliquer les raisonnements en usage, pour les courants de basse fréquence, aux courants de haute fréquence. Tel n'est pas le cas, et nous nous sommes assez spécialisé en Télégraphie sans fil pour ne pas commettre une semblable erreur.

» Nous avons au contraire été un des premiers à signaler que, pour certains phénomènes, une ligne de transmission devait être assimilée à une antenne réceptrice et que, si l'on voulait obtenir sur cette ligne, à l'entrée d'un poste, un point zéro de tension pour les ondes à haute périodicité, il fallait réunir ce point à la terre par un condensateur exactement comme on le fait pour le pied de l'antenne pour y assurer un point zéro de tension.

» Pour ce qui concerne les surtensions d'origine intérieure, qui sont à fréquence moindre, les observations de M. Boucherot sont beaucoup plus fondées, et, au seul point de vue théorique, on ne peut s'empêcher d'en reconnaître la justesse.

» Au seul point de vue pratique, on doit toutefois faire quelques réserves. Que veut-on démontrer ? que les limiteurs de tension sont inutiles ? Nous ne croyons pas que ce soit là ce que M. Boucherot veut dire.

» Que l'impédance des mêmes machines varie, suivant les circonstances, de zéro à l'infini ? Et qu'alors on doit chercher un

appareil s'adaptant de lui-même au point de vue résistance au phénomène *qui va se produire*. Ce serait dire que toute recherche est inutile et que le limiteur est un appareil pratiquement inutilisable.

» Si, au contraire, on admet qu'il y a ou qu'on peut trouver des limiteurs capables de rendre des services, la principale question qu'on doit se poser est de savoir quelle est la résistance ohmique qu'ils doivent avoir.

» Personne ne discutera qu'on ne peut leur donner une valeur nulle ou même faible, car s'il en était ainsi, ils créeraient sur le réseau un court-circuit dont la rupture par l'appareil lui-même amènerait de nouvelles surtensions. Il y a donc une valeur minima à adopter dans chaque cas particulier. On peut toutefois tourner cette difficulté en intercalant une résistance d'abord progressivement décroissante puis progressivement croissante comme nous l'avons proposé.

» Doit-on admettre, d'autre part, les valeurs de 2000 à 40000 ohms adoptées aujourd'hui? Beaucoup de constructeurs le font en prenant un ohm ou un demi-ohm par volt sans même s'occuper des puissances en jeu. Cette manière de faire, encore plus simpliste que la nôtre, ne nous paraît pas à recommander.

» M. Boucherot nous dit que l'impédance d'une machine varie de zéro à l'infini. Supposons donc qu'elle soit infinie, ce qui est le cas le plus défavorable.

» Dans ce cas, à la rupture instantanée d'un courant I , la tension aux bornes d'un limiteur de résistance r sera rI , puisque tout le courant qui passait dans la machine avant la rupture devra prendre ce nouveau chemin. Si l'on a affaire à une génératrice, fonctionnant sous 10 000 volts, et débitant 58 ampères; si, d'autre part, on s'impose de ne pas dépasser trois fois la tension aux bornes au moment de la rupture d'un court-circuit, quand le régime de ce court-circuit est établi et qu'il y a trois fois l'intensité normale, on a

$$r = \frac{5800 \times 3}{58 \times 3} = 100 \text{ ohms.}$$

» Si, au contraire, on admet que

$$\sqrt{\frac{L}{C}} = 860,$$

on aurait trouvé

$$1\sqrt{\frac{L}{C}} \frac{R}{\sqrt{\frac{L}{C}} + R} = 5800 \times 3,$$

d'où

$$R = 112 \text{ ohms.}$$

» On voit par cet exemple qu'il est absolument indifférent en pratique d'estimer plus ou moins juste l'impédance de la machine et qu'on trouve le même résultat quand cette impédance varie entre 860 ohms et l'infini.

» D'autre part, on ne discutera pas que personne n'oserait mettre sur une machine un limiteur intercalant d'un seul coup une résistance de 100 ohms seulement.

» On arrive donc aux trois conclusions suivantes :

» 1^o Les résistances des limiteurs de tension actuels sont à peu près celles qu'on peut intercaler d'un coup sur le réseau sans y amener de perturbations.

» 2^o Ces résistances sont beaucoup trop grandes pour diminuer les surtensions et l'on doit en mettre un certain nombre en parallèle;

» 3^o Ces résistances groupées en parallèle doivent avoir un fonctionnement nettement indépendant, faute de quoi elles amèneraient des perturbations comme s'il s'agissait d'un seul appareil de résistance équivalente. Le fonctionnement ne pouvant être indépendant que si l'allumage et l'extinction se produit par des variations faibles de la tension, c'est-à-dire que si l'extinction a lieu à chaque demi-période, on ne peut les combiner avec des appareils à soufflage qui fonctionnent deux à trois secondes sans arrêt. »

M. le PRÉSIDENT remercie M. Giles de la Communication qu'il vient de développer avec tant de clarté et MM. Grosselin et Boucherot pour les observations qu'ils ont présentées.

Les questions traitées préoccupent à juste titre tous les électriciens et sont étudiées avec un soin particulier par les première et quatrième sections du Comité de la Société.

Tous les spécialistes sont d'accord avec M. Giles sur l'élévation de la fréquence des décharges atmosphériques.

M. Bochet rappelle les conclusions, en parfaite harmonie avec celles de l'orateur, qu'il a présentées en 1899 dans une étude sur les parafoudres ⁽¹⁾.

Enfin, il remercie tout particulièrement M. Giles de s'être imposé un long voyage pour entretenir la Société de ses intéressants travaux.

⁽¹⁾ *Bulletin* d'avril 1899.

LES PROPRIÉTÉS MAGNÉTIQUES DU FER AUX FRÉQUENCES ÉLEVÉES.

Recherches faites au Laboratoire Central d'Électricité ;

PAR M. R. JOUAUST.

« De nombreux expérimentateurs (1) ont cherché à déterminer les propriétés magnétiques du fer aux fréquences élevées, mais toutes ces expériences ont été faites généralement avec des oscillations amorties et sur des éprouvettes constituées par des faisceaux de fils très minces d'un diamètre tel que l'action des courants induits fût presque négligeable.

» Dans ces conditions, presque tous ont trouvé que, pour des fréquences comprises entre 10^6 et 10^7 , la perméabilité restait constante, lorsque le champ magnétisant variait et était comprise entre 100 et 200.

» Ces résultats, obtenus avec des oscillations amorties, ne fournissent pas de renseignements suffisants sur la manière dont se comporterait le fer soumis à des courants alternatifs de haute fréquence non amortis. Pourtant c'est dans ces conditions qu'on peut songer à utiliser ce métal pour la construction d'alternateurs à haute fréquence dont la réalisation ferait faire de grands progrès à la téléphonie sans fil. Aussi le capitaine Brenot, dans son rapport au Congrès de Marseille, exprimait-il le désir que des expériences fussent entreprises à ce sujet.

» Les expériences citées plus haut présentent du reste deux autres inconvénients au point de vue des renseignements qu'elles sont susceptibles de fournir sur l'utilisation du fer aux fréquences élevées.

» Ces expériences ayant été faites dans un but purement théorique, on a cherché en les réalisant à diminuer l'action des courants induits en utilisant comme nous l'avons dit des fils de fer excessivement minces. Or l'emploi de noyaux de machines constitués par

(1) KLEMENCIC, *Wiener Berichte*, 1894, p. 205. — SAINT-JOHN, *Phil. Mag.*, 1894, p. 425; 1895, p. 297. — VARLEY, *Dis. Strassburg*, 1901.

3^e SÉRIE, TOME I, 1911. — N° 1.

des fils serait presque impossible, d'une part étant données les difficultés de construction et d'autre part étant donné le prix très élevé des matières premières, le kilogramme de fil de 0,025 mm revenant à 1250 fr.

» Des recherches faites dans un but pratique devaient donc porter sur des tôles et l'on devait chercher à déterminer ce que devenaient les propriétés magnétiques des éprouvettes réalisées avec ces tôles sous l'action des courants induits.

» Il est à remarquer également qu'au point de vue des résultats quantitatifs, les expériences faites sur des faisceaux de fil de fer doivent conduire à trouver des perméabilités trop faibles par suite de l'écrouissage du métal. C'est ainsi qu'on peut expliquer que Klemencic a trouvé des perméabilités plus faibles avec des fils de 0,04 mm qu'avec des fils de 0,2 mm.

» Au cours de nos expériences, nous avons eu connaissance de travaux de Schames (1) faits dans des conditions à peu près identiques aux nôtres. Mais ces expériences ont été faites avec des faisceaux de fil de fer de 0,05 mm, et il nous semble que certaines précautions nécessaires pour obtenir une variation sinusoïdale du courant magnétisant n'aient pas été prises. L'absence de ces précautions très nécessaires, comme nous le verrons dans la suite, est susceptible de modifier au point de vue quantitatif les résultats obtenus.

» Le générateur de courant à haute fréquence que nous avons utilisé dans nos expériences était un arc type Poulsen. L'arc jaillit dans une atmosphère de gaz d'éclairage entre une cathode en charbon et une électrode en cuivre refroidi. L'appareil que nous avons utilisé nous avait du reste été prêté par M. Jeance.

» Cet arc était alimenté sous 300 volts avec plusieurs rhéostats et une bobine de self en série; la tension aux bornes était d'environ 70 volts, l'intensité de 3 ampères. En dérivation aux bornes de l'arc était placé le circuit dans lequel prend naissance le courant alternatif.

» Ce circuit était constitué par un condensateur en papier paraffiné de 0,3 microfarad et une bobine de self constituée par un

(1) *Jahrbuch der drahtlosen Telegraphie und Telephonie*, t. III, 1910, p. 343.

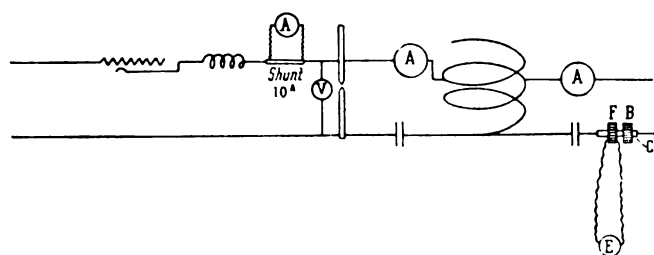
tube de cuivre enroulé en spirale (modèle des résonateurs Oudin utilisés en télégraphie militaire).

» Les oscillations qui prennent naissance dans ce circuit ne sont nullement sinusoïdales et leur période est très mal définie. Si l'on approche de ce circuit un ondemètre, on constate que la déviation de l'aiguille de l'instrument présente, en fonction de la capacité de l'appareil, un certain nombre de maxima; l'existence de ces maxima n'est du reste pas très nette, et l'aiguille de l'ampèremètre de l'ondemètre oscille perpétuellement d'une façon qui implique à la fois des variations dans la période et dans l'intensité du courant alternatif engendré par l'arc.

» Des mesures faites en utilisant ce courant, comme l'a fait Schames, ne peuvent donc pas répondre à un état d'aimantation bien défini.

» Pour obvier à cet inconvénient, nous avons utilisé le dispositif employé par MM. Jeance et Colin, qui consiste à accoupler avec le circuit oscillant un autre circuit, et de faire varier les constantes des deux circuits de façon à les amener en résonance (*fig. 1*).

» Dans ces conditions, on obtient, à l'ondemètre, en réglant conve-



A, ampèremètre.
V, voltmètre.
E, électromètre.

B, anneau de bois.
F, anneau de fer.
C, tube de cuivre.

nablement l'arc, un maximum très net indiquant dans l'ensemble des deux circuits l'existence d'une oscillation parfaitement définie. A cette oscillation se superpose encore une oscillation de fréquence triple environ; la déviation que donne à l'ondemètre cette oscillation est environ le quart de la déviation que donne l'oscillation principale. Un calcul très simple montre que, dans ces conditions, l'amplitude de cette oscillation n'est environ que 8 pour 100 de l'amplitude de

l'oscillation principale. Dans ces conditions, elle est négligeable. La fréquence de l'oscillation principale était de 150 000.

» Le mode opératoire utilisé pour déterminer la perméabilité des tôles était le suivant. Les tôles étaient découpées et empilées de façon à constituer un toroïde de 5,5 cm de diamètre extérieur, de 3,8 cm de diamètre intérieur et de 2,5 cm de hauteur.

» Ce toroïde était enfilé sur un des conducteurs du second circuit oscillant, conducteur constitué du reste par un tube creux de 3 cm de diamètre.

» Il était donc soumis à un champ magnétisant de $\frac{2I}{r}$, I étant l'intensité maximum du courant qui parcourt le conducteur, r (') le rayon moyen du toroïde.

» A côté de ce toroïde était placé un toroïde de même dimension en bois. Les deux toroïdes étaient recouverts d'un enroulement induit.

» On mesurait, au moyen d'un électromètre à miroir de Carpentier, la tension aux bornes de chacun des deux enroulements.

» Le rapport de la tension aux bornes de l'enroulement placé sur l'éprouvette métallique à la tension aux bornes de l'enroulement sur le toroïde en bois donnait ce que nous appellerons *par définition* la perméabilité des tôles envisagées pour les courants alternatifs de la fréquence utilisée.

» Un certain nombre de précautions sont nécessaires dans ces mesures.

» Étant donnée la valeur faible de la perméabilité, il est nécessaire d'apporter à la valeur trouvée une correction provenant de ce chef que les tôles étant isolées, le volume de l'éprouvette n'est pas occupé en entier par le métal.

» L'électromètre employé doit également avoir une faible capacité pour éviter que des phénomènes de résonance dans le circuit qui le contient ne viennent fausser les mesures.

» Ce qu'on veut mesurer, en effet, c'est la force électromotrice $u = M \frac{di_1}{dt}$, i_1 étant le courant qui traverse le conducteur sur lequel

(²) En réalité, étant données les dimensions du toroïde, le champ magnétisant moyen diffère un peu du champ magnétisant suivant la ligne moyenne. La correction est facile à calculer.

le toroïde est enfilé, M le coefficient d'induction mutuelle entre ce conducteur et l'enroulement secondaire de coefficient de self-induction L ; ce qu'on mesure, c'est la différence de potentiel u' aux bornes de l'électromètre. Appelons i_2 le courant dans l'enroulement électrométrique.

» Nous avons

$$i_2 = \frac{u}{\sqrt{R^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2}},$$

$$u' = \frac{i_2}{C\omega},$$

expression qui devient, en remarquant que la résistance R est faible et qu'on peut par suite négliger l'expression $R^2 C^2 \omega^2$,

$$e' = \frac{e}{1 - LC\omega^2}.$$

» On a mesuré L et C et constaté que ces grandeurs avaient des valeurs telles qu'on pouvait admettre que

$$u' = u.$$

» Ce dispositif permet également la mesure des pertes dans l'éprouvette. Il suffit de monter en série les enroulements secondaires des deux toroïdes et de mesurer la différence de potentiel aux bornes de cet ensemble.

» Cette différence de potentiel est la résultante des forces électromotrices induites dans les deux toroïdes. La résolution d'un triangle dont on connaît les trois côtés permet de mesurer l'angle que font entre eux les deux vecteurs représentant ces différences de potentiel et, comme la différence de potentiel induite dans l'enroulement placé sur le toroïde en bois est décalée de 90° sur le courant primaire, on peut connaître l'angle φ , décalage entre ce courant et la force électromotrice induite dans les tôles. Pour la puissance dépensée dans les tôles, en appelant I le courant de la spire magnétisante, u la force électromotrice induite, n le nombre de tours de l'enroulement secondaire, P la puissance dépensée dans les tôles, on a

$$P = \frac{uI}{n} \cos \varphi.$$

» L'intensité I était évaluée au moyen d'un thermique étalonné avec l'ampèremètre thermique de Broca pour hautes fréquences.

» Les essais ont porté :

» 1^o Sur des tôles ordinaires de 0,5 mm;

» 2^o Sur des tôles au silicium de 0,22 de diamètre.

» Les expériences n'ont porté jusqu'ici que sur des champs inférieurs à 3 gauss. Il était nécessaire, pour opérer à des inductions plus élevées, de modifier le dispositif employé, et il ne semblait pas nécessaire de pousser immédiatement l'étude plus loin, la valeur que les pertes eussent été susceptibles d'atteindre dans des champs plus intenses eussent amené des échauffements inadmissibles dans les machines.

» Les résultats de ces expériences peuvent se résumer en quelques mots :

» Pour les champs compris entre 1 et 3 gauss :

» 1^o Les tôles d'acier de 0,5 se comportent comme ayant une perméabilité apparente constante et égale à 15;

» 2^o Les tôles d'acier au silicium de 0,22 se comportent comme ayant une perméabilité apparente constante de 63;

» 3^o Dans des champs de 2,2 gauss l'angle que nous avons appelé φ a pour l'acier une valeur de 30°, les pertes atteignant 30 watts au kilogramme total;

» 4^o Dans les tôles au silicium, dans les mêmes conditions, l'angle φ est environ 32°, les pertes atteignant 150 watts au kilogramme total;

» 5^o L'élévation de température de l'éprouvette de tôles de 0,5 au bout d'une heure de marche de fonctionnement, dans les conditions indiquées plus haut ne dépasse pas 60°.

» *Comparaisons de ces résultats expérimentaux avec les recherches théoriques.* — J.-J. Thomson a montré qu'en supposant constante la perméabilité du métal, la réduction de l'induction sous l'action des courants induits pouvait se calculer par la formule

$$\frac{w_a}{w_e} = \frac{1}{am\sqrt{2}} \left(\frac{\cos \text{hyp } 2ma - \cos 2ma}{\cos \text{hyp } 2ma - 2 \cos 2ma} \right)^{\frac{1}{2}},$$

qui, pour les fréquences élevées, se réduit à

$$\frac{v_{ba}}{v_{bc}} = \frac{1}{am\sqrt{2}},$$

v_{ba} induction en courant alternatif, v_{bc} en continu et

$$m = 2\pi \sqrt{\frac{\mu F'}{\sigma}},$$

F fréquence du courant, σ résistivité de l'acier dans le système C. G. S., a étant en centimètres la demi-épaisseur de la tôle.

» Cette formule ne peut s'appliquer qu'au cas de la perméabilité constante. Nous pouvons remarquer chemin faisant que, si la perméabilité était variable, la valeur à introduire dans le calcul serait à peu près celle correspondant à la périphérie, puisque, pour les fréquences élevées, c'est là seulement que l'induction a une valeur notable.

» Mais ici nous avons constaté que la perméabilité apparente était sensiblement constante; nous savons d'autre part que les autres expérimentateurs qui se sont occupés de la question sur des fils minces ont trouvé une perméabilité constante.

» Il est donc bien certain que la formule de J.-J. Thomson doit être applicable dans le cas que nous avons envisagé.

» On voit que dans ces conditions, en admettant pour le fer une résistivité de 10 microhms-centimètre, on arrive par la formule de J.-J. Thomson à une perméabilité apparente de 15 en admettant pour la perméabilité vraie une valeur voisine de 150. Ce résultat correspond bien comme ordre de grandeur avec ce qu'ont trouvé les autres expérimentateurs utilisant des ondes amorties. Il est un peu plus faible, 150 au lieu de 250. On trouve de même que pour ramener à 63 la perméabilité apparente des tôles au silicium de 40 microhms-centimètre de résistivité, il faut admettre une perméabilité vraie de 150.

» Les mêmes procédés de calcul donnent, pour valeur des pertes par courants induits (pertes qui sont prépondérantes dans le cas de fréquences élevées) :

$$W = \frac{m\sigma H_0^2 10^{-7}}{32\pi^2 a} \left(\frac{\sin \text{hyp } 2ma - \sin 2ma}{\cos \text{hyp } 2ma - \cos 2ma} \right),$$

qui aux fréquences élevées se ramènent à

$$W = \frac{\sqrt{2} f \pi H_0^2 10^{-7}}{16 \pi a}.$$

» Cette dernière formule revient à admettre, comme l'a fait M. Boucherot, qu'aux fréquences élevées, l'angle α prend une valeur limite de 45° . Nous avons trouvé que pratiquement cet angle avait des valeurs de 30° .

» Le cosinus de 30° est 0,87 au lieu de 0,71 pour 45° .

» Les pertes calculées par les formules théoriques sont donc de 25 pour 100 plus faibles que celles trouvées pratiquement.

» On voit néanmoins qu'en introduisant dans toutes ces formules une valeur de 150 pour la perméabilité, on peut en tirer des résultats donnant des renseignements suffisants pour la pratique industrielle, la valeur des pertes étant calculée par défaut.

» On peut dire pour résumer :

1° Qu'il semble que le fer se comporte aux fréquences de l'ordre d'environ 100000 comme ayant une perméabilité constante d'environ 150. C'est de l'ordre de grandeur de la perméabilité trouvée pour des fils minces avec des oscillations amorties (Schames, qui opéra sur des fils minces avec les oscillations directes de l'arc, trouve des valeurs un peu plus élevées, 250 environ) ;

2° L'introduction de cette valeur dans la formule de J.-J. Thomson permet de calculer la réduction de perméabilité due à l'effet pelliculaire ;

3° Les pertes observées sont un peu plus grandes que celles déduites des formules théoriques. Mais la différence, 20 pour 100 environ, n'est pas assez grande pour empêcher de se servir de ces formules pour discuter les conditions dans lesquelles il faut faire travailler le fer.

» Ainsi nous avons vu que le transformateur à haute fréquence que nous avons en quelque sorte réalisé avec nos toroïdes était susceptible de fonctionner longtemps avec des tôles d'acier de 0,5 mm. Soit u la force électromotrice induite.

» L'emploi de tôles au silicium de 0,25 donnait une force électromotrice $4u$, mais les pertes dans le métal étaient de 4 à 5 fois plus grandes, ce qui est à peu près conforme aux résultats fournis par la

formule

$$W = \frac{\sqrt{222} H_0^2 10^{-7}}{16 \pi a}$$

le fonctionnement de ce transformateur devenait impossible au bout de quelques minutes. On voit que, pour ramener les pertes à des valeurs permettant le fonctionnement, on est amené à faire passer un courant 2 fois moins grand dans l'enroulement magnétisant. La force électromotrice sera encore $2u$.

» Il importe de bien remarquer que ces conclusions ne se rapportent qu'aux fréquences voisines de 100000.

» Rien ne prouve que la coïncidence approchée entre la théorie et l'expérience que nous avons constatée se maintiendrait par des fréquences plus élevées.

» Ainsi, tandis que Fleming ⁽¹⁾ a constaté que, pour des fils de cuivre, la formule de lord Kelvin et l'expérience donnaient des résultats identiques, pour l'augmentation de résistance à la fréquence 100000. Broca ⁽²⁾, au contraire, a trouvé de grosses divergences aux fréquences plus élevées.

» Pour les fréquences de l'ordre de 100000, la concordance, si grossière qu'elle soit entre la théorie et la pratique, est susceptible de rendre des services, étant donné le peu de moyens dont on dispose pour la prédétermination des appareils à haute fréquence. »

M. le PRÉSIDENT remercie M. Jouaust d'avoir bien voulu apporter à la Société le résultat de ses intéressants travaux.

La séance est levée à 11 h du soir.

⁽¹⁾ FLEMING, *Jahrbuch der drahtlosen Telegraphie und Telephonie*, t. III, 1910, p. 362.

⁽²⁾ *Comptes rendus*, t. CXL, 1905, p. 1238.

BIBLIOGRAPHIE.

Leitfaden zum electrotechnischen Praktikum (*Guide de la pratique électrique*), par le D^r G. BRIOU, Privat-docent à l'École supérieure technique de Dresde. B.-G. Teubner, éditeur à Leipzig, 404-xiii pages, avec 380 figures dans le texte.

Mettre l'étudiant à même de reconnaître au laboratoire les phénomènes les plus importants de l'Électrotechnique, les dispositions relatives à la construction des machines et des instruments de mesure, lui faire découvrir pas à pas par l'expérience les relations entre les différentes grandeurs électriques et mécaniques, en appréciant le côté technique trop souvent traité comme quantité négligeable et lui faire toucher enfin la relation étroite entre les formes concrètes des phénomènes et les conceptions physiques fondamentales, tel est le but que s'est proposé l'auteur en rédigeant le plan très original et intéressant du Guide de la pratique électrique qui pourrait s'intituler *Cours de mesures pratiques*. C'est surtout, par conséquent, de la pratique du laboratoire qu'il s'occupe, de la raison d'être des principes et de l'emploi des appareils.

Les 15 Chapitres s'inspirent d'une excellente méthode d'enseignement où l'on sent l'expérience d'un enseignement réfléchi.

Nous citerons les divisions suivantes :

INTRODUCTION : généralités sur les mesures et les modes de représentation de grandeur;

Étude des sources de courant employées dans les laboratoires;

Description comparative des instruments de mesures pratiques;

Essais des piles et accumulateurs;

Mesures magnétiques;

Mesure des courants alternatifs;

Remarques sur les mesures particulières aux machines électriques : courant continu, courant alternatif, transformateurs, moteurs asynchrones, commutatrices;

Mesure des sources de lumière électrique.

Méthodes et appareils de mesures électriques et magnétiques, par A. ILIOVICI, préparateur à l'École supérieure d'Électricité. (Fascicules n^{os} 20 et 21 de l'*Encyclopédie électrotechnique*, L. Geisler, éditeur.)

Ces fascicules représentent les première et deuxième Parties d'un Ouvrage sur les mesures électriques qui sera lu avec fruit par toute personne désireuse de s'assimiler les méthodes de mesures industrielles, et de pouvoir effectuer ces mesures elle-même, au laboratoire, sans être obligée pour cela d'avoir recours aux conseils d'un praticien. Pour

atteindre ce double but, l'auteur a délibérément laissé de côté un certain nombre de méthodes d'intérêt pratique à peu près nul pour donner, par contre, de grands développements aux méthodes couramment employées dans les laboratoires industriels, et pour celles-ci, le lecteur trouvera, dans l'Ouvrage de M. Iliovici, tout l'enseignement dont il aura besoin, depuis leur théorie, nettement exposée sans calculs superflus, jusqu'à leur réalisation pratique, avec la description minutieuse des appareils qu'elles exigent.

Le lecteur saura gré à M. Iliovici d'avoir abordé l'étude théorique des conditions de sensibilité des méthodes de mesures les plus importantes, étude qu'on ne trouvait guère jusqu'ici que dans des Traités essentiellement théoriques; il trouvera également dans son Livre des données très précieuses sur les appareils, détails de construction, valeur des constantes, etc., la plupart de ces renseignements ayant été fournis à l'auteur par les constructeurs eux-mêmes.

Le premier fascicule commence par des généralités sur les méthodes de mesures et les appareils formant, en quelque sorte, une introduction dont la lecture évitera aux débutants bien des tâtonnements et des causes d'insuccès. Vient ensuite une étude générale des systèmes oscillants et de la galvanométrie où l'auteur, ennemi des calculs ennuyeux, a réussi à donner à sa rédaction une tenue mathématique des plus satisfaisantes.

Nous croyons avoir fait ressortir assez nettement l'esprit de cet Ouvrage pour qu'il nous suffise d'énumérer rapidement les questions traitées. Outre les généralités et la galvanométrie le fascicule 20 contient la mesure des résistances; le fascicule 21 renferme un complément sur les systèmes oscillants, qui prépare la théorie des oscillographes et des appareils enregistreurs. L'auteur y traite, en plus, de la mesure des intensités, des différences de potentiel, des capacités et des coefficients d'induction.

En somme, M. Iliovici vient d'écrire la première Partie d'un Livre dont le succès nous paraît assuré.

Les enroulements industriels des machines à courant continu et à courants alternatifs; théorie et pratique, avec une préface de Paul JANET, directeur du Laboratoire central et de l'École supérieure d'Électricité; par Eugène MAREC. Grand in-8°, 240 pages, 212 figures, 1911. Gauthier-Villars, éditeur, quai des Grands-Augustins, 55, Paris.

L'auteur, appelé par ses fonctions professionnelles à diriger les travaux d'atelier et particulièrement les exercices de bobinage (calculs et exécution) des Élèves de l'École supérieure d'Électricité, sait, par expérience, à quelles difficultés de compréhension se heurte l'esprit du jeune technicien, facilement égaré parmi la multiplicité et l'apparente complexité des lois des enroulements. C'est pourquoi il s'est efforcé de dissocier la difficulté en ses éléments.

PREMIÈRE PARTIE : Courant continu. — Étant données les conditions générales à réaliser par un enroulement d'induit pour devenir le siège de forces électromotrices intégralement utilisables, l'auteur envisage l'une après l'autre chacune de ces conditions essentielles et montre à quelle conclusion pratique elle aboutit.

Ainsi la loi de l'enroulement s'échafaude degré par degré et le lecteur parvient sans difficultés aux formules qui réalisent le problème dans son ensemble.

La réalisation pratique des enroulements est traitée dans une forme véritablement

industrielle et avec un souci de documentation puisé aux meilleures sources, qui fait du Livre un Manuel précieux pour l'Ingénieur constructeur.

Enfin des procédés de vérification d'isolement des bobinages et de recherche des défauts dans les induits avariés complètent fort utilement cette première Partie.

SECONDE PARTIE : Courants alternatifs. — Quelques notions théoriques, mais suffisantes à fixer le caractère des enroulements alternatifs, préambulent.

L'auteur donne ensuite une série de schémas avec légende explicative.

Ces schémas indiquent nettement et d'une manière saisissante comment se distinguent et se différencient les divers enroulements possibles. C'est de la part de l'auteur une originalité fort heureusement inspirée. Quant à la réalisation pratique, elle est aussi d'une documentation soignée.

En résumé, un processus simple, sans complications de formules, un texte imagé de schémas et de reproductions photographiques rendent aisée la compréhension de l'Ouvrage, que sa simplicité de fond et de forme n'empêche cependant pas d'être complet et très nettement adapté aux besoins de l'Industrie : tous les Ingénieurs pourront en tirer profit. Ajoutez à ces mérites que l'Ouvrage, édité par Gauthier-Villars, se présente avec cette facture claire et élégante, agréable au regard et commode aux recherches, qui distingue cette Imprimerie.

Notions générales sur la Télégraphie et la Téléphonie sans fil, par R. DE VALBREUZE, (4^e édition), *La Lumière électrique*, Paris, 1910 : 1 vol. in-8°.

Cette quatrième édition diffère bien des premières par son étendue.

Elle constitue certainement, quoi qu'en dise l'auteur dans sa Préface, l'Ouvrage dans lequel on peut à l'heure actuelle trouver le plus de renseignements sur les divers dispositifs utilisés en Télégraphie ou en Téléphonie sans fil.

Mais cet Ouvrage présente d'autres mérites : l'auteur a su exposer les propriétés des oscillations électriques et les principes de la Télégraphie sans fil sans avoir recours aux Mathématiques, mettant ainsi à la portée de tous ceux qu'intéressent les progrès de la Science un Ouvrage susceptible de rendre en même temps de grands services à bien des praticiens qui ont besoin de connaître des faits précis, sans avoir le temps ni les moyens de suivre les longs calculs qui ont servi à les établir.

Annuaire du Bureau des Longitudes pour 1911. 1 vol. Paris, Gauthier-Villars.

Suivant les dispositions adoptées en 1904, l'*Annuaire des Longitudes* pour 1911 publie les Tableaux relatifs à la Métrologie, aux Monnaies, à la Géographie et à la Statistique, ainsi qu'à la Météorologie.

Quelques modifications ont été apportées à la partie astronomique où figure une Notice sur les comètes apparues en 1909 et sur la comète de Halley; dans la Métrologie, on a ajouté une Note sur le *carat métrique* obligatoire en France à partir du 1^{er} janvier 1911.

En outre, parmi les Notices scientifiques il convient de signaler celle de M. H. Poincaré sur la XVI^e conférence de l'Association géodésique internationale, où se trouve indiqué

un projet de mesure de la différence de longitude Paris-Athènes au moyen de la télégraphie sans fil, et celle de M. G. Bigourdan sur l'éclipse de Soleil qui se produira en 1912, éclipse dont il sera fort intéressant d'observer notamment l'influence magnétique.

**Introduction à l'établissement des lignes aériennes
de transports d'énergie électrique**, par O. CAHEN. 1 vol. Paris; Dunod et Pinat.

M. O. Cahen, qui a participé à l'établissement d'importants réseaux, a pensé faire œuvre utile pour les industriels, les entrepreneurs et les agents d'administration, en groupant dans cet Ouvrage les connaissances qu'exige, de la part de l'ingénieur, l'étude d'un transport de force sur lignes aériennes.

Il y expose, à cet effet, l'état actuel de la législation concernant la distribution d'énergie dont la dernière réglementation date de mars 1910, en insistant sur les prescriptions techniques et les différents régimes d'autorisation qui résultent du règlement en vigueur; puis il donne la classification et un résumé de la législation des voies du domaine public qu'empruntent ou traversent toutes les distributions électriques.

L'auteur traite ensuite de l'importante et délicate opération du piquetage de la ligne, de la recherche des autorisations particulières et administratives, de la forme de la demande, etc., et donne, en Annexe, quelques modèles des contrats, conventions, demandes à intervenir.

Ce texte se termine par un recueil concernant toutes les lois sur les distributions d'énergie.

Agenda Dunod pour 1911 : Électricité, par J.-A. MONTPELLIER.
1 vol. Paris, Dunod et Pinat.

Cet Agenda, de format commodément portable, renferme tout ce qu'il est essentiel de connaître sur les quantités et unités physiques, géométriques et mécaniques; sur les phénomènes magnétiques et électriques, de même que sur la production de l'énergie électrique, les accumulateurs, la canalisation, l'éclairage électrique, etc.

L'édition 1911, rédigée entièrement à nouveau, constitue, sous sa forme actuelle, un aide-mémoire complet et concis de toute l'Électrotechnique industrielle.

Précis d'Électricité industrielle, par A. GOULLIART, 1 vol.
Paris, Félix Alcan, 1911.

Considérant que les divers Ouvrages qui traitent de l'étude de l'électricité sont, en général, ou trop simples ou trop spéciaux et que, dès lors, ils peuvent ou sembler insuffisants ou ne s'adresser qu'à une clientèle restreinte, l'auteur a choisi un juste milieu entre ces deux extrêmes pour écrire, au point de vue industriel, une étude logique de l'électricité, renforcée de multiples applications pratiques; et, à côté de nombreux tours de main, il n'a pas hésité à introduire des formules simplifiées, mais suffisamment complètes et absolument indispensables dans certains cas.

Les installations, la construction, la réparation ne peuvent, en effet, être entreprises

empiriquement, et la lecture de cet Ouvrage permettra à ceux qui ont une instruction moyenne de saisir, de comprendre et d'utiliser les indications qu'ils y trouveront.

Ces indications sont relatives, en particulier, aux divers montages de sonneries et de téléphones; à la construction, la réparation, le montage et la mise en route des dynamos ordinaires, avec des détails pratiques sur la construction des organes de l'électromoteur.

400 figures, comprenant des schémas très intelligibles, sont intercalées dans le texte de ce Livre, lequel se termine par des Tables qui fournissent, à la façon des manuels, des données précises et immédiates, dispensant ainsi de calculs plus ou moins compliqués, et par une notice sur les secours à donner aux blessés par l'électricité.

Il sera certainement bien apprécié des praticiens.

Manuel pratique d'Électricité industrielle, par Charles GAUET. (Deuxième édition, revue et augmentée.) — Paris, Ch. Béranger, 1910; 1 vol. in-16, cart. toile.

Ce Manuel, très élémentaire et bien documenté, peut servir de guide utile aux monteurs électriciens désireux d'acquérir les notions simples indispensables en pratique.

Force motrice d'atelier, Guide pratique pour le choix et l'installation de la force motrice dans les ateliers, par E. ALLAIN-LAUNAY. — Paris, Ch. Béranger, 1911; 1 vol. in-8°, broché.

Ce petit Volume rentre également dans le cadre des connaissances élémentaires que peuvent rechercher les industriels désireux d'éclairer leur choix dans l'établissement de leurs installations.

Cours élémentaire d'Électricité industrielle, par P. ROBERJOT, Préface de M. P. JANET. (Bibliothèque de l'Enseignement technique.) — Paris, Dunod et Pinat, 1911; 1 vol. in-16 jésus, cart. toile.

Mettre l'enseignement de l'Électricité industrielle à la portée des Écoles pratiques de commerce et d'industrie, tel a été le but de l'auteur.

La forme est simple et accessible aux élèves de ces Écoles; les matières essentielles sont seules envisagées, comme il sied au programme.

C'est l'avis de M. Janet dans la Préface où il présente le Livre de son ancien élève.

Nous ne pouvons que nous rallier à une opinion aussi autorisée.

LISTE DES OUVRAGES

OFFERTS A LA SOCIÉTÉ INTERNATIONALE DES ÉLECTRICIENS.

(Suite.)

La Bibliothèque est ouverte aux Membres de la Société, tous les jours
de 3 heures à 6 heures, excepté les dimanches et jours de fêtes,
12, rue de Staël.

France.

Agenda Dunod 1911 : Électricité (Aide-Mémoire pratique de l'Électricien), par J.-A. MONTPELLIER, 33^e édition complètement revue et augmentée. Paris, Dunod et Pinat, 1911; 1 vol. petit in-8, relié peau souple. (*Don des éditeurs.*)

Cours élémentaire d'Électricité industrielle, par P. ROBERJOT. Préface de M. P. JANET. Paris, Dunod et Pinat, 1911; 1 vol. in-16 jésus, cartonné toile (Bibliothèque de l'enseignement technique). (*Don des éditeurs.*)

Force motrice d'atelier. Guide pratique pour le choix et l'installation de la force motrice dans les ateliers, par E. ALLAIN-LAUNAY. Paris, Ch. Béranger, 1911; 1 vol. in-8, broché. (*Don de l'éditeur.*)

Génératrices de courants et moteurs électriques. Introduction à l'étude de l'Électrotechnique appliquée, par C. GUITTON. Paris, Dunod et Pinat, 1911; 1 vol. in-8, broché. (Cours professé à l'Institut électrotechnique de l'Université de Nancy.) (*Don des éditeurs.*)

Georges Berger (1834-1910), par F. FRÉDÉRIC-MOREAU. Paris, 1910; 1 plaquette in-8 avec portrait hors texte. (*Don de l'auteur.*)

Hippolyte Fontaine, Ingénieur-électricien, Officier de la Légion d'honneur (1833-1910). Discours prononcés sur sa tombe. Notices nécrologiques, par Ph. BOISSERAND. Paris, Impr. Gauthier-Villars, 1910; une plaquette grand in-8 avec portrait hors texte. (*Don de la famille.*)

Introduction à l'établissement des lignes aériennes de transports d'énergie électrique, par Octave CAHEN. Paris, Dunod et Pinat, 1910; 1 vol. in-8, broché. (*Don des éditeurs.*)

Précis d'Électricité industrielle à l'usage des praticiens, par A. GOULLIART. Paris, Félix Alcan, 1911; 1 vol. in-16, broché. (*Don de l'éditeur.*)

Recueil de problèmes avec solutions sur l'électricité et ses applications pratiques, par M. VIEWEGER. Traduction française de G. CAPART. 2^e édition, revue,

corrigée et augmentée de nouveaux Chapitres. Paris, Dunod et Pinat, 1911; 1 vol. in-8, broché. (*Don des éditeurs.*)

Régulation des groupes électrogènes, par L. BARBILLION. 1^{re} et 2^e Partie. Paris, L. Geisler, 1910; 2 vol. in-8, brochés. *Encyclopédie électrotechnique*, 38^e et 39^e fascicule. (*Don de l'éditeur.*)

Traité de Chimie générale, par NERNST. Ouvrage traduit sur la 6^e édition allemande par A. CORVISY. 1^{re} Partie : *Propriétés générales des corps. Atome et molécule.* Paris, A. Hermann et fils, 1911; 1 vol. in-8, broché. (*Don des éditeurs.*)

Étranger.

Le grandi applicazioni del cemento armato. Bacinie canali industriali, par l'ing. Carlo CAMINATI. Torino, Casa editrice libraria F. Fiandesio e C., 1911; 1 vol. in-folio avec 10 planches hors texte. (*Don de l'auteur.*)



BULLETIN
DE LA
SOCIÉTÉ INTERNATIONALE
DES
ÉLECTRICIENS.

SOMMAIRE.

Compte rendu de la réunion mensuelle de février 1911 : admission de membres titulaires, p. 66. — Membres décédés, p. 67. — Simplification des récepteurs d'ondes hertziennes par l'usage de détecteurs avec ou sans force électromotrice : Récepteurs portatifs (**M. P. Jégou**), p. 68. — Le logomètre et ses applications (**M. L. Joly**), p. 79. — Sur les compteurs électrolytiques et, en particulier, le compteur Stia (**M. Hatfield**), p. 99.

Note relative aux dispositions adoptées par la Société Sud-Lumière pour les traversées de chemins de fer, p. 112.

CORRESPONDANCE : Congrès international des applications électriques ; Turin, 1911, p. 115.

OUVRAGES OFFERTS, p. 119.

COMPTE RENDU

DE LA

RÉUNION ORDINAIRE MENSUELLE

du mercredi 1^{er} février 1911 ⁽¹⁾.

PRÉSIDENCE DE M. A. BOCHET.

La séance est ouverte à 8 h 35 m du soir et le procès-verbal de la dernière réunion mensuelle est adopté.

Il est donné connaissance des Ouvrages offerts à la Bibliothèque de la Société (voir p. 119) et des demandes d'admission suivantes :

⁽¹⁾ La Société n'est pas solidaire des opinions émises par ses Membres dans les discussions, ni responsable des Notes ou Mémoires publiés dans le *Bulletin*.

MM.

- Beauvallon** (Louis-Marie-Joseph de), Ingénieur chez le Représentant de la *Société Alsacienne de Constructions mécaniques*, à Bordeaux (Gironde). — Présenté par MM. Janet et Chaumat.
- Berné** (Auguste-Théophile), Chef des Services électriques, de la force motrice et de l'entretien aux *Établissements de Dion-Bouton*, 56, rue de l'Aqueduc, à Paris. — Présenté par MM. Boucherot et Gratzmuller.
- Crévoisier** (Georges), Électricien à la *Compagnie française Thomson-Houston*, 62, avenue de la République, à Montrouge (Seine). — Présenté par MM. Fieschi et Piroëlle.
- Domenach** (Louis-André-Alfred), Élève à l'*École supérieure d'Électricité*, 8, rue Edme-Guillout, à Paris. — Présenté par MM. Janet et Chaumat.
- Douchin** (Marcel-Joseph-Émile), Sapeur au 3^e régiment du Génie, villa des Fougères, 19, rue Carnot, à Sannois (Seine-et-Loire). — Présenté par MM. Bertin et Orain.
- Duval** (Henri-Louis-Marcel), Ingénieur électricien, 30, rue des Feronniers, à Douai (Nord). — Présenté par MM. Boreau et Brunswick.
- École d'Application du Génie maritime**, 140, boulevard du Montparnasse, à Paris. — Présentée par MM. Janet et Chaumat.
- Halleux** (Armand), Professeur à l'*École des Mines et à la Faculté Polytechnique du Hainaut*, 92, boulevard Charlemagne, à Bruxelles (Belgique). — Présenté par MM. Boucherot et Bochet.
- Hugues** (Louis-Auguste), Sapeur au 5^e régiment du Génie, 33, rue Lamarck, à Paris. — Présenté par MM. Courtois et J. Lefèvre.
- Ithier** (Émile-René-Charles), Élève à l'*École supérieure d'Électricité*, 10, rue Ernest-Renan, à Paris. — Présenté par MM. Janet et Chaumat.
- Jung** (Amédée-Alexis), Élève à l'*École supérieure d'Électricité*, 43, rue Lévis, à Paris. — Présenté par MM. Janet et Chaumat.
- Latour** (Joseph), Chef du Service électrique aux *Acéries de Longwy*, à Herserange (Meurthe-et-Moselle). — Présenté par MM. Bochet et Winch.
- Lestic** (Louis), Élève à l'*École supérieure d'Électricité*, 8, rue Edme-Guillout, à Paris. — Présenté par MM. Janet et Chaumat.
- Martinroche** (Antonin), Ingénieur aux *Usines Michelin*, à Clermont-Ferrand (Puy-de-Dôme). — Présenté par MM. Janet et Chaumat.
- Montaron** (Charles-Eugène), rue de la Poste, à Château-Gontier (Mayenne). — Présenté par MM. Janet et Chaumat.
- Pernier** (Marcel-Albert-Ferréol), Élève à l'*École supérieure d'Électricité*, 90 bis, rue Saint-Dominique, à Paris. — Présenté par MM. Janet et Chaumat.
- Privé** (Pierre-Alexandre), Ingénieur des Arts et Manufactures, Ingénieur diplômé de l'*École supérieure d'Électricité*, Ingénieur à la *Compagnie de Fives-Lille*, 17, rue de Belfort, à Givors (Rhône). — Présenté par MM. Janet et Chaumat.
- Riboud** (Marcel-Joseph), Élève à l'*École supérieure d'Électricité*, 4, passage Stanislas, à Paris. — Présenté par MM. Janet et Chaumat.
- Trékoff** (Alexandre), Ingénieur électricien diplômé de l'*Institut électrotechnique de l'Université de Lille*, Ingénieur mécanicien diplômé de l'*Institut électrotechnique et de Mécanique appliquée de l'Université de Nancy*, 159, rue de Solférino, à Lille (Nord). — Présenté par MM. Nègre et Swyngedauw.
- Tujague** (Marcel), Élève à l'*École supérieure d'Électricité*, 8, rue Edme-Guillout, à Paris. — Présenté par MM. Janet et Chaumat.

M.

Vincent (Marcel), Élève à l'*École supérieure d'Électricité*, 42, rue des Jeûneurs, à Paris. —
Présenté par MM. Janet et Chaumat.

Ces candidats sont élus membres titulaires de la Société internationale des Électriciens.

M. le PRÉSIDENT fait part du décès de MM. *Semmola*, *J. Blanc* et *Cabral*. Il en exprime les regrets de la Société et communique, à ce propos, une lettre dans laquelle M. Castanheira das Nèves, Délégué général de la Société internationale des Électriciens en Portugal, retrace la carrière administrative et les travaux de M. P.-B. Cabral, qui, après avoir été son collaborateur, puis son successeur comme Inspecteur général des Télégraphes et des Phares du Portugal, avait été nommé professeur d'Électrotechnique à l'Institut industriel de Lisbonne.

L'ordre du jour appelle les Communications techniques.

**SIMPLIFICATION DES RÉCEPTEURS D'ONDES HERTZIENNES PAR L'USAGE DE
DÉTECTEURS AVEC OU SANS FORCE ÉLECTROMOTRICE. — RÉCEPTEURS
PORTATIFS.**

M. Paul JÉGOU. — « Messieurs, les deux nouvelles applications importantes qui ont été faites des ondes hertziennes au cours de l'année passée à la *détermination de l'heure* et à la *mesure des différences de longitude* ont fait ressortir d'une façon particulière, il me semble, l'intérêt qu'il y avait à pouvoir réaliser des postes radiotélégraphiques de grande puissance, puisque c'est de leur énergie seulement que dépendront directement les zones sur lesquelles pourra être perçu le signal horaire et opérer la mesure des différences de longitude entre deux postes recevant simultanément les émissions du poste de comparaison, émissions nécessaires pour pouvoir appliquer la méthode dite *des coïncidences téléphoniques*.

» D'autre part, pour profiter intégralement de tous les avantages que peuvent procurer ces deux nouvelles applications, il est facile de se rendre compte combien il peut être utile de créer des récepteurs simples, légers et très transportables, voire même suffisamment réduits pour qu'on puisse les porter sur soi. Il suffira de citer entre autres les services que rendra aux colonies la méthode radiotélégraphique pour déterminer la position de points éloignés, difficilement accessibles, parfois même reconnus seulement par des explorateurs ou des colonnes d'opération.

» Mon intention n'est pas d'étudier l'émission, mais il m'a paru intéressant de faire ressortir combien s'est simplifié le récepteur radiotélégraphique depuis l'époque des premiers essais de Marconi, qui utilisait le tube à limaille de Branly, seul détecteur connu à ce moment, jusqu'à nos jours, maintenant que la radiotechnique s'est enrichie de détecteurs variés.

» Je commencerai donc par rappeler combien évidemment le récepteur avec tube à limaille se prête peu au transport, étant donnés la multiplicité des organes, leur fragilité, leur poids et leur volume : On sait en effet qu'il exige (*fig. 1*) un relais très sensible, un frap-

peur, dispositif somme toute barbare, pour rétablir constamment la sensibilité du tube, un Morse, des résistances variables de réglage, des shunts pour étouffer les étincelles de rupture qui troubleraient le fonctionnement, et enfin une pile d'une certaine énergie pour actionner à la fois le relais et le Morse.

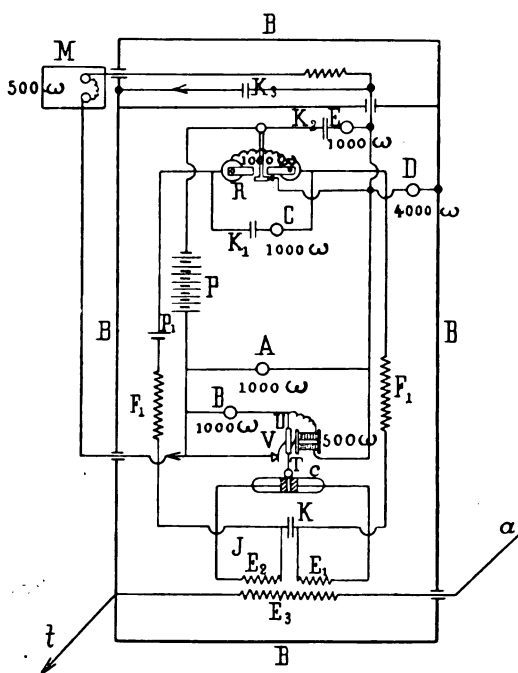


Fig. 1. — Récepteur à cohéreur.

C, Cohéreur; T, Frappeur; J, Jigger; K₁, K₂, K₃, Condensateurs; A, B, C, D, Résistances sans self; R, Relais; M, Morse; P, Piles.

» Il convient d'ailleurs d'ajouter le *Jigger* d'accouplement de l'antenne avec le cohéreur. Il est aisé de concevoir qu'un tel ensemble est peu fait pour se prêter à la réalisation d'un appareil transportable.

» Jusqu'en 1900, c'est en vain qu'on s'efforce de le simplifier, espérant en même temps rendre son fonctionnement plus certain. Quelques essais d'association d'un récepteur téléphonique avec des cohéreurs dits *auto-décohérents* faisaient augurer qu'on arriverait à réaliser des récepteurs à lecture au son qui seraient considérablement moins encombrants et définitivement d'un fonctionnement régulier et sûr. Le principe du détecteur *électrolytique*, donné par le commandant Ferrié à cette époque, résolut le pro-

blème cherché, étant caractérisé par une obéissance parfaite à la cadence des signaux Morse due, si je puis dire, à sa décohérence spontanée et par son insensibilité aux chocs, trépidations et autres influences extérieures quelconques.

» Le montage d'un tel récepteur est aujourd'hui classique (*fig. 2*) :

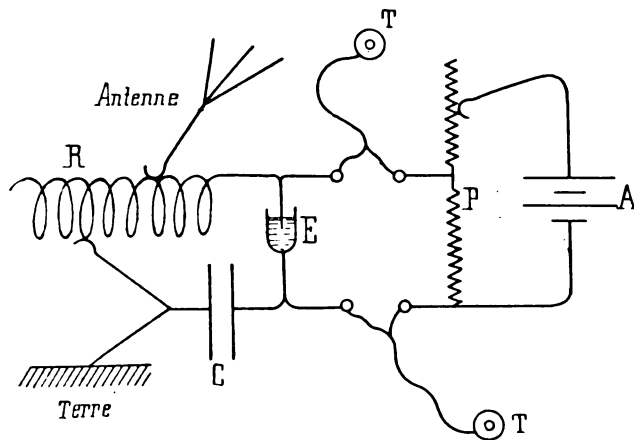


Fig. 2. — Récepteur avec détecteur électrolytique.
A, Accumulateur double; P, Potentiomètre; E, Détecteur électrolytique; C, Condensateur;
R, Résonateur; T, Téléphones.

Un accumulateur double débite sur une résistance potentiométrique destinée à régler la tension appliquée sur le détecteur de façon à réaliser une tension voisine de l'électrolyse du bain acidulé choisi, dans lequel plongent les deux électrodes de platine dont l'une d'elles, prise comme électrode positive, est constituée par un fil très fin coupé au ras d'un tube de verre effilé et fermé à la lampe; cette électrode constitue la *pointe sensible* ou *active* du détecteur tandis que l'autre électrode de forme et dimension quelconque est connectée au pôle négatif de la source par l'intermédiaire de récepteurs téléphoniques très sensibles spécialement caractérisés par des membranes extra-minces et des enroulements très résistants (7000 ω) sur les bobines.

» Il ne reste plus qu'à accoupler le détecteur avec le circuit oscillatoire connecté à l'antenne, lequel est constitué par un résonateur associé avec un condensateur et qu'on branche aux bornes du détecteur.

» On remarquera que ce récepteur ne comprend aucun organe

délicat et fragile et que l'ensemble peut être contenu dans une boîte de dimension et poids pratiquement transportable.

» Malgré tout, je me suis demandé s'il ne serait pas encore possible de simplifier ce montage et, tout d'abord, j'ai cru devoir rechercher un dispositif qui pourrait se passer de l'accumulateur double, celui-ci me semblant présenter un double inconvénient : celui du poids malgré la faible capacité de l'accumulateur nécessaire et surtout celui du soin de le maintenir en état de charge par des recharges répétées; ce dernier inconvénient est d'autant plus grave qu'il enlève ce que je pourrai appeler l'*autonomie* du récepteur, en ce sens que, pour recharger l'accumulateur, on est obligé de recourir à une autre source d'énergie, pratiquement une dynamo. Cet inconvénient n'apparaissait pas en télégraphie sans fil, puisque tout poste comprend nécessairement une émission et une réception et que cette émission peut venir au secours de la réception. Il n'en est plus de même quand il s'agit des deux nouveaux problèmes que nous avons exposés plus haut, puisque les postes d'observation n'utilisent qu'un récepteur.

» On dira peut-être que l'accumulateur n'est pas nécessaire, qu'il peut être remplacé par des piles, mais si l'on veut utiliser des piles sèches ou Leclanché de maniement commode et d'entretien nul, on vérifie que deux éléments ne suffisent pas : pratiquement il en faudrait quatre. Cependant je suis arrivé à n'en utiliser que deux en ayant recours à des détecteurs électrolytiques spéciaux dont l'électrode inactive est en plomb avec un électrolyte d'eau acidulée sulfurique. Ces détecteurs ont une tension critique ou d'électrolyse très légèrement supérieure à celle réalisée par le montage en série de deux éléments Leclanché ou secs; du même coup, il devient donc possible d'appliquer directement les deux éléments sur le détecteur, et ainsi on peut se passer du potentiomètre (*fig. 3*).

» Pour parer aux écarts possibles de tension que peuvent présenter les associations de deux éléments secs ou Leclanché, ce qui pourrait avoir une légère répercussion sur la sensibilité du récepteur, j'ai cru devoir adjoindre une *bobine transformatrice* genre téléphonique, dont les éléments soigneusement déterminés permet, comme l'expérience le prouve, de maintenir d'une part la sensi-

bilité constante et en même temps de faire usage de récepteurs téléphoniques couramment employés en téléphonie. La façon d'utiliser cette bobine est inverse de son utilisation en téléphonie : c'est l'enroulement en fil fin et long qui est pris comme inducteur et connecté à la place des récepteurs dans le montage clas-

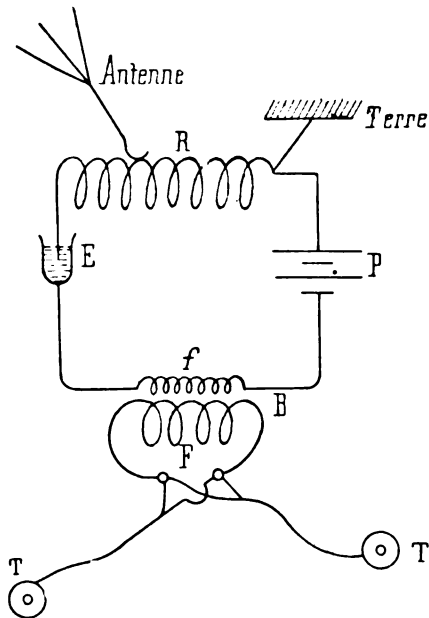


Fig. 3. — Récepteur simplifié avec détecteur électrolytique.

P, Pile de deux éléments Leclanché ou secs; E, Détecteur électrolytique à cathode en plomb;
R, Résonateur; B, Bobine transformatrice dont *f* enroulement fil fin et *F* enroulement fil gros.

sique; les récepteurs sont alors branchés aux bornes de l'enroulement en fil gros et court. On remarquera qu'avec ce montage les récepteurs ne sont plus traversés par le courant constant qui passe par le détecteur et qu'ils n'entrent en vibration que sous l'influence du courant induit par le courant pulsatoire provoqué par l'action des ondes sur le détecteur.

» Si l'on veut réduire le volume du récepteur, rien n'empêche d'ailleurs de mettre la bobine à l'intérieur du cylindre résonateur, puisqu'aucun réglage n'est à faire sur cette bobine ce qui n'est pas le cas du potentiomètre.

» Poursuivant le but de la simplification, j'ai pu placer le résonateur en série entre le détecteur et la pile ce qui permet de se passer du condensateur dont le principal rôle dans le récepteur

classique est surtout de s'opposer à la dérivation du courant qui résulterait du montage du résonateur aux bornes du détecteur.

» Évidemment une certaine capacité existe toujours dans le circuit formé par le détecteur, le résonateur, la pile et la bobine transformatrice, ce qui permet de rechercher la résonance surtout avec les oscillations amorties dont on fait usage.

» Inutile de faire remarquer que ce récepteur hérite intégrale-

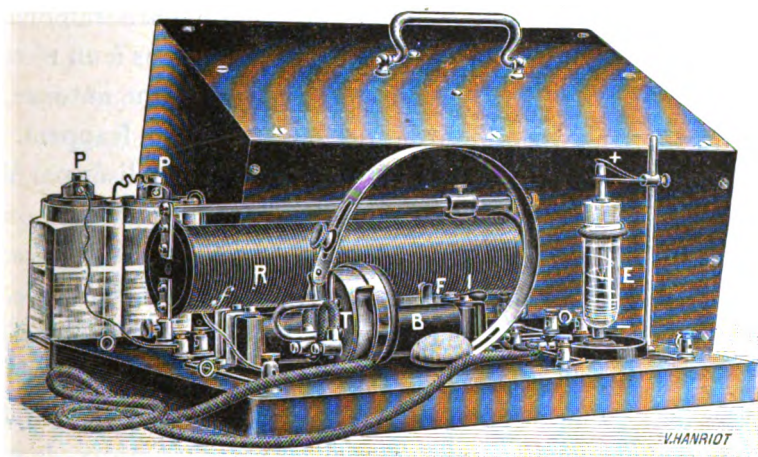


Fig. 4. - Vue de l'appareil horaire suivant le dispositif de la figure 3.

ment des qualités de robustesse et de régularité qui caractérisent le récepteur classique avec détecteur électrolytique. L'appareil complet se présente alors sous l'aspect de la figure 4.

» Pour compléter l'exposé des récepteurs réalisables avec les détecteurs demandant le secours d'une énergie auxiliaire, je dois citer le *détecteur magnétique* de Marconi et l'*Audion* de Forest.

» L'un et l'autre ne peuvent, il me semble, donner lieu qu'à des récepteurs complets moins transportables que ceux que je viens de décrire : le premier détecteur exige en effet un mouvement d'horlogerie pour créer les variations de champ magnétique qui devront engendrer les phénomènes d'hystérésis que les ondes hertziennes modifieront.

» Quant à l'*Audion*, il demande une énergie extérieure suffisante pour maintenir incandescent le filament de la lampe qui doit émettre les ions chargés de redresser les oscillations.

» D'autres récepteurs plus simplifiés encore ont été réalisés dans ces derniers temps : je dois les décrire, car ce qui les rend tout particulièrement intéressants, c'est qu'ils permettent de réduire le récepteur à sa plus simple expression : je veux parler des détecteurs qui fonctionnent sans le secours d'une pile ou source d'énergie électrique extérieure.

» A cette classe appartiennent tout d'abord ceux qui utilisent les *détecteurs à cristaux*, dont le premier en date a été réalisé par Dunwoody en 1905, qui observa qu'un cristal de carborandum, enchâssé entre deux électrodes métalliques connectées à un récepteur téléphonique et à un circuit oscillatoire couplé à une antenne, permettait de déceler directement les oscillations qui le frappent.

» Depuis lors, dans la même catégorie ont été réalisés par M. Pickard le *périkon* et le *silicon* qui utilisent : le premier, le contact entre une pyrite de cuivre et un cristal de zincite, et le second, le contact d'une surface de silicium avec une pointe métallique.

» Le capitaine Brenot, a repris, l'an dernier, le détecteur à carborandum de Dunwoody et a montré la supériorité des résultats réalisables par l'emploi du carborandum vert à la place du carborandum noir plus commun. Il enchâsse des cristaux de carborandum dans un amalgame d'étain et une calotte sphérique creuse vient reposer par ses rebords aigus sur les arêtes vives du cristal, en exerçant une pression réglable par un ressort. Le montage qu'il préconise est des plus simples (*fig. 5*). L'antenne est accouplée inductivement avec le circuit contenant un condensateur et le détecteur : c'est aux bornes du condensateur qu'on place les récepteurs téléphoniques. Le détecteur, d'ailleurs, est lui aussi shunté par un second condensateur.

» La sensibilité de ces récepteurs à cristaux, quand ils sont bien réglés par un choix convenable de la pression et de certaines arêtes du cristal, est aussi grande que celle réalisée par les meilleurs détecteurs électrolytiques. Ils donneraient la solution de l'appareil non seulement transportable mais même portatif s'ils ne se déréglaient pas sous l'influence des chocs et des trépidations inhérentes à la marche, et si leur réglage ne demandait pas une petite émission locale, une étincelle de sonnerie tout au moins.

» M'appuyant sur ce fait bien connu qu'un détecteur électro-

lytique ordinaire à deux électrodes en platine peut, par lui-même, déceler des ondes énergiques dans un récepteur téléphonique directement branché à ses bornes et que cette propriété s'accroît considérablement quand l'électrode *inactive* est en plomb au lieu de platine; je me suis proposé de rechercher si, par un choix judicieux du métal choisi pour constituer l'électrode inactive, il ne

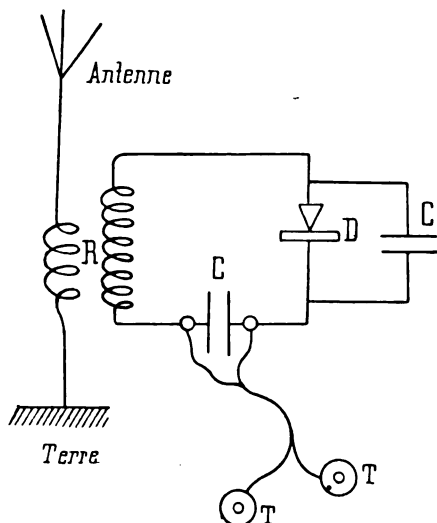


Fig. 5. — Récepteur avec détecteur à cristaux.

D, Détecteur à cristaux; C, Condensateur; R, Résonateur; T, Téléphones.

serait pas possible d'accroître encore dans une large mesure cette propriété singulièrement intéressante, et je n'ai pas tardé à reconnaître qu'un amalgame de mercure et d'étain pur accroissait notablement la sensibilité au point de pouvoir déceler les ondes les plus faibles (*fig. 6*).

» Pratiquement le détecteur se compose d'une éprouvette en verre dont la base est fermée à la lampe sur une électrode en platine qu'on recouvre de l'amalgame mercure-étain versé au fond de cette éprouvette; sur cet amalgame, on verse de l'eau acidulée et dans ce liquide plonge l'électrode sensible d'un détecteur électrolytique ordinaire.

» En branchant le récepteur téléphonique aux bornes du détecteur, on est à même de déceler les oscillations hertziennes avec tout autant de sensibilité qu'avec les détecteurs électrolytiques ordinaires.

» A l'inverse des détecteurs à cristaux, ce détecteur a l'avantage de partager avec le détecteur électrolytique ordinaire son insensibilité aux chocs et trépidations, mais des phénomènes de polarisation sont à étudier pour parer parfois à des affaiblissements de sensibilité que présentent seulement certains détecteurs. L'action d'un dépolarisant semble devoir donner la solution.

» Je crois maintenant pouvoir compléter cet exposé par quelques

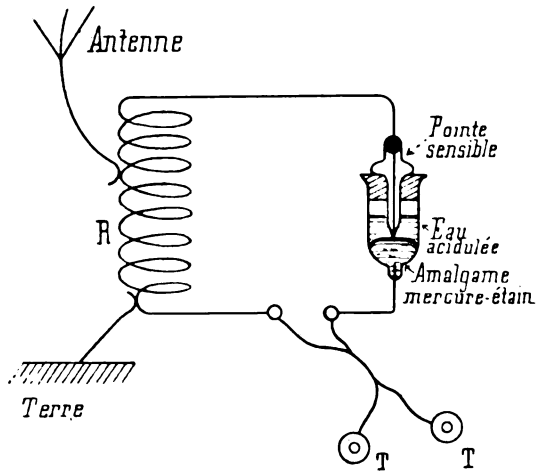


Fig. 6. — Récepteur avec détecteur électrolytique sans force électromotrice.
E, Détecteur avec cathode en mercure-étain; T, Téléphones, R, Résonateur.

considérations sur le fonctionnement de ces détecteurs à cristaux quand on les compare au fonctionnement du détecteur électrolytique n'exigeant aussi aucune force électromotrice.

» On a émis différentes hypothèses, par exemple celle d'une action calorifique au point de contact du métal avec le cristal; quelques-uns verraient, du moins dans certains détecteurs à cristaux qui possèdent une légère force électromotrice intérieure due au contact des deux corps différents, comme la réalisation de détecteurs électrolytiques solides. Cette théorie, qu'admet le capitaine Brenot, s'associerait assez bien à celle qu'on peut donner du détecteur électrolytique sans force électromotrice.

» On objectera aussitôt que dans les détecteurs à cristaux on ne voit pas trop où se retrouve la pointe sensible de l'électrolytique puisqu'il est inutile, comme l'expérience le prouve, de se donner le soin de réaliser un contact infiniment petit du métal avec le cristal:

bien au contraire, on peut sans inconvénient établir le contact par une surface notable.

» Je crois utile de rappeler à ce propos qu'en faisant des recherches sur la sensibilité réalisée quand on associe plusieurs détecteurs électrolytiques en série ou en parallèle, j'ai pu me rendre compte que le montage en parallèle, bien qu'ayant comme résultat effectif celui d'augmenter le nombre de points de contact des pointes sensibles avec le liquide, ne nuisait pas à la sensibilité, mais qu'au contraire, elle était au moins égale à celle de la pointe la plus sensible ainsi associée.

» Une comparaison physique grossière peut permettre de s'imaginer le sens de cette propriété en se reportant au cas d'une canalisation d'eau par exemple, dont le conduit se subdiviserait en plusieurs branches contenant chacune une soupape dont la sensibilité, pour céder ou s'ouvrir sous l'action de la pression, serait différente l'une de l'autre : seule la plus sensible pourra céder et laisser passer le fluide tandis que les autres pourront ne pas intervenir.

» Par analogie on se rend compte comment la multiplicité des points de contact du métal avec le cristal peut ne pas nuire à la sensibilité; un seul de ces multiples contacts pouvant entrer en action sous l'influence des ondes, celui évidemment qui est le plus sensible et qui réalise le contact le plus intime de tous les contacts réalisés qui se trouvent comme connectés en parallèle. »

M. le PRÉSIDENT remercie M. Jégou de cette intéressante Communication.

LE LOGOMÈTRE ET SES APPLICATIONS.

M. L. JOLY. — « Messieurs, en mars dernier, M. Carpentier, qui réalisa en 1881 le premier appareil mesurant le rapport de deux courants sous la forme classique de la boussole de proportion, présentait à l'Académie des Sciences un nouveau modèle d'appareil destiné à la même mesure et désigné sous le nom de *logomètre* (de *logos*, rapport). Depuis lors, nous avons eu l'occasion de faire quelques applications de cet appareil et nous vous demandons la permission de vous les présenter ce soir.

» Rappelons d'abord en quelques mots le principe du logomètre. Il comprend essentiellement un équipage mobile dans lequel circulent les deux courants à comparer et, agissant sur cet équipage, un champ magnétique continu et alternatif suivant la nature de ces courants.

» Dans le cas général, en raison des facilités de construction que donne ce mode de réalisation, l'équipage mobile est constitué par deux cadres égaux analogues à ceux des galvanomètres Deprez-d'Arsonval. Ces deux cadres sont accolés et montés sur le même axe pivotant, comme le représente la figure 1. Chacun d'eux

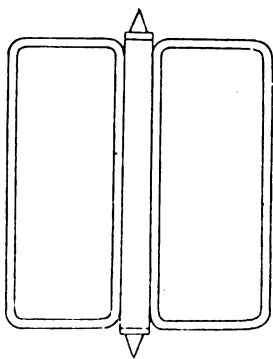


Fig. 1.

est parcouru par un des courants à comparer : l'arrivée des courants se fait par de minces rubans d'argent sans force directrice appréciable. Les pièces polaires de l'aimant ou de l'électro de

champ et leur noyau répartiteur sont disposés excentriquement de façon que la densité du champ de part et d'autre du noyau va en décroissant de A vers B (*fig. 1 bis*). L'axe de l'équipage coïncide sensiblement avec celui du noyau.

» Dans ces conditions, si I_1 et I_2 sont les deux courants à comparer, H_1 et H_2 les champs sensiblement radiants dans lesquels se trouvent les côtés extérieurs des cadres pour un angle donné

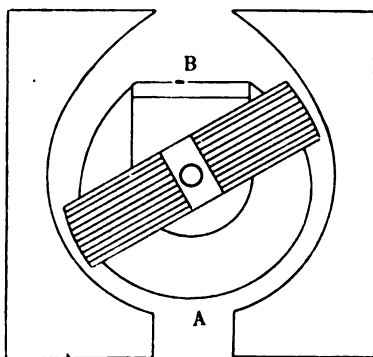


Fig. 1 bis.

de l'équipage, on aura l'équilibre, à condition que $I_1 H_1 = I_2 H_2$ ou $\frac{I_1}{I_2} = \frac{H_2}{H_1}$, aux constantes près; et cet équilibre sera stable si les forces appliquées aux côtés extérieurs des cadres sont dirigées vers les plages faibles du champ. Le rapport $\frac{H_2}{H_1}$ n'étant fonction que de la déviation, on voit qu'à chaque position d'équilibre de l'équipage correspond un rapport de courant déterminé.

» Étant donnée la forme sous laquelle vous le voyez réalisé (*fig. 2*), le logomètre semble se distinguer plus nettement de la boussole de proportion que de l'ohmmètre à deux cadres, bien connu, et dont l'emploi s'est généralisé depuis que le premier modèle, étudié au laboratoire de M. Carpentier, vous a été présenté en 1893 par M. Armagnat. Pourtant, on peut dire que le logomètre diffère plus de ces deux appareils, que ceux-ci ne diffèrent entre eux; et cela, en raison du mode spécial d'utilisation du champ magnétique d'où dérivent ses propriétés particulières.

» Les ohmmètres ordinaires utilisent, en effet, un champ magnétique à peu près uniformément réparti, où la variation du couple

électromagnétique est due à la variation de l'angle de l'équipage avec la direction générale du champ. Il en résulte, pour le rapport des courants en fonction de la déviation, une loi de tangente, et dans ces conditions, la déviation de 90° correspond à une variation sensiblement infinie du rapport des courants. L'ohmmètre ordinaire est donc un appareil à échelle très étendue

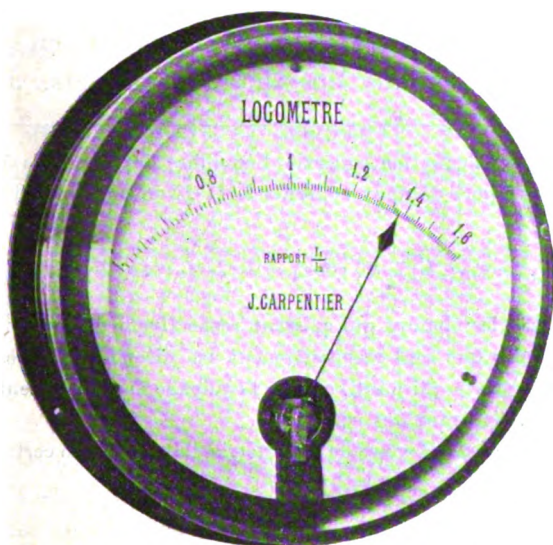


Fig. 2. — Logomètre.

mais qu'il est difficile de rendre sensible. Au contraire, dans le logomètre, on a cherché à s'affranchir de cette loi de tangente et du défaut de sensibilité correspondant, en faisant en sorte que la variation du couple soit due aux variations d'intensité des composantes du champ magnétique, pour les différentes positions de l'équipage. Ce résultat est obtenu grâce à l'entrefer variable que le constructeur peut façonner en vue de réaliser telle loi de déviation qu'il recherche avec une variation aussi faible que possible du rapport des courants pour la déviation totale.

» C'est ainsi qu'il est possible, dans l'état actuel de notre construction, d'obtenir des appareils donnant toute leur déviation pour un rapport variant de 1 à 2. Bien entendu, cette grande sensibilité ne va pas sans quelques inconvénients au point de vue de la force directrice et des difficultés de réalisation. En fait, c'est une variation du rapport de 1 à 4 environ qui, jusqu'ici, nous a

donné au total les meilleurs résultats et qui nous a permis de réaliser la plupart des appareils dont je vais maintenant vous entretenir ⁽¹⁾.

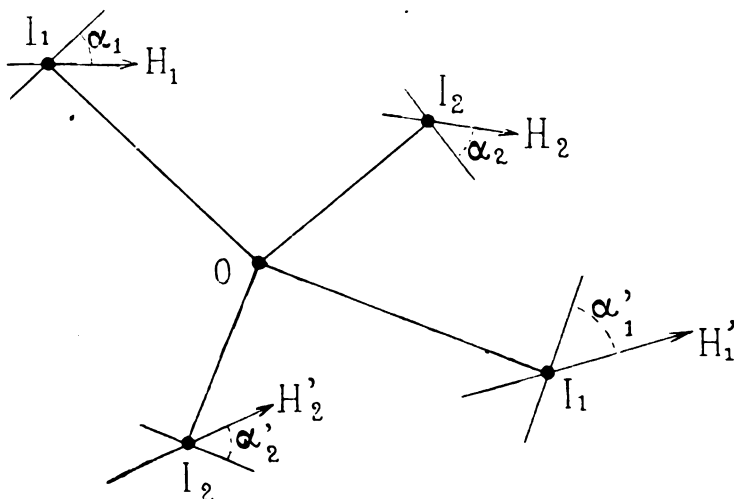
» Messieurs, en examinant avec vous quelques applications du logomètre, je n'ai pas l'intention de vous énumérer toutes celles auxquelles on pourrait songer, mon but étant surtout de vous engager à nous en suggérer de nouvelles. D'autre part, je ne voudrais pas retenir longtemps votre attention en vous donnant sur chacun des appareils des détails complets. Je m'efforcerai

(¹) Si l'on considère l'équation générale d'équilibre des appareils à deux cadres destinés à mesurer le rapport de deux courants I_1 et I_2 on pourra toujours la mettre sous la forme

$$(1) \quad K_1 I_1 H_1 \cos \alpha_1 + K'_1 I_1 H'_1 \cos \alpha'_1 = K_2 I_2 H_2 \cos \alpha_2 + K'_2 I_2 H'_2 \cos \alpha'_2.$$

H_1, H'_1, H_2, H'_2 étant les champs qui agissent respectivement sur les côtés des cadres : $\alpha_1, \alpha'_1, \alpha_2, \alpha'_2$ les angles que font respectivement les directions de ces champs avec la perpendiculaire à la droite qui joint l'axe de l'équipage O aux éléments de courant considérés ; K_1, K'_1, K_2, K'_2 étant des constantes.

En général, d'ailleurs, soit à cause de la symétrie, soit parce que certains côtés des cadres



sont inactifs, cette équation se simplifie. C'est ainsi que, pour la plupart des appareils ordinaires, elle ne contient que deux termes et s'écrit

$$(2) \quad K I_1 H_1 \cos \alpha_1 = I_2 H_2 \cos \alpha_2.$$

Or dans le cas de l'ohmmètre à deux cadres rectangulaires que nous pouvons considérer en particulier, on a sensiblement $H_1 = H_2 = \text{const.}$ et de plus, si l'on désigne

de vous faire sentir avant tout quelles sont les conditions qui sont favorables à l'emploi du logomètre, et dans ce but, je distinguerai trois catégories principales d'applications, selon que la mesure à effectuer est ramenée à celle d'une résistance variable, ou bien qu'on fait appel à d'autres facteurs que la résistance pour modifier le courant fourni par la source utilisée, ou enfin, qu'on se trouve en présence d'une mesure plus complexe que celle d'une variation de courant, comme c'est souvent le cas en alternatif.

» En tant qu'ohmmètre, le logomètre se distinguant par sa grande sensibilité, présentera un intérêt particulier dans les cas

par α l'angle de l'équipage avec la direction générale du champ, on peut poser :

$$\cos \alpha_1 = \cos \alpha \quad \text{et} \quad \cos \alpha_2 = \sin \alpha.$$

De sorte que l'équation devient

$$(3) \quad \frac{I_1}{I_2} = k \tan \alpha.$$

C'est la loi de tangente dont nous venons de parler : on voit que le rapport $\frac{I_1}{I_2}$ varie de 0 à ∞ quand α varie de 90° .

Dans presque tous les appareils dérivés de cet ohmmètre, il en est de même; les quantités $\alpha_1, \alpha'_1, \alpha_2$ et α'_2 varient à peu près proportionnellement à la déviation α , produisant ainsi la variation du couple, tandis que les quantités H_1, H'_1, H_2, H'_2 restent sensiblement constantes lorsque α varie ou n'interviennent qu'accessoirement.

Au contraire, dans le cas du logomètre, l'équation (2) se simplifie différemment : on a, le champ étant sensiblement radiant :

$$\cos \alpha_1 = \cos \alpha_2 = 1.$$

De plus les quantités H_1 et H_2 sont essentiellement variables avec la déviation α puisque c'est sur leur variation que l'on compte pour produire la variation du couple électromagnétique.

On peut donc poser

$$\frac{H_2}{H_1} = f(\alpha),$$

la fonction f étant déterminée par la forme de l'entrefer.

L'équation (2) devient donc

$$(4) \quad \frac{I_1}{I_2} = K' f(\alpha).$$

En réalisant l'entrefer sous la forme qu'indique la figure 1 bis, on donne à peu près à $f(\alpha)$ la forme $a + b\alpha$, a et b étant tels que la fonction varie de 1 à 2 par exemple, lorsque α varie de 90° . Théoriquement, on pourrait arriver par cette méthode à sensibiliser indéfiniment l'appareil.

où l'on a en vue l'étude des variations d'une résistance autour d'une valeur donnée.

» Voici, par exemple, un appareil réalisé pour l'étude des résistances des lampes sous courant (*fig. 3*), et qui donne par lecture

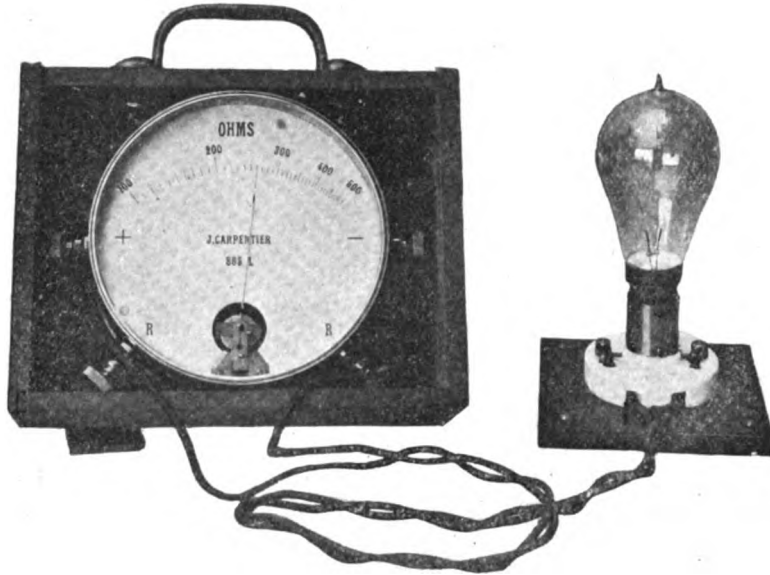


Fig. 3. — Ohmmètre pour lampe.

directe cette résistance avec une approximation intéressante autour de la valeur normale.

» Comme autre exemple, je vous signalerai l'application que MM. Sartiaux et Aliamet en ont fait aux lignes téléphoniques à longue distance. Un logomètre installé en chaque poste du réseau, conformément au schéma de la figure 4, permet, en effet, de lire directement jusqu'à quelle station il est possible de correspondre, la ligne se trouvant coupée et bouclée à la station qui se trouve déjà en communication. L'appareil, dans ces conditions, consomme moins de 5 milliampères sous 10 volts et n'agit pas sur les relais adjoints aux différents postes.

» Toujours dans le même ordre d'applications, nous avons pu réaliser un modèle d'indicateur de pertes en ligne pouvant donner directement, lorsqu'il est installé sur une ligne fixe, la distance en kilomètres d'un défaut ou bien permettant, lorsqu'il est employé comme appareil de contrôle avec magnéto (*fig. 5*), de

mesurer d'abord la résistance de la ligne bouclée, puis de déduire la résistance jusqu'au défaut d'une seconde mesure faite en chan-

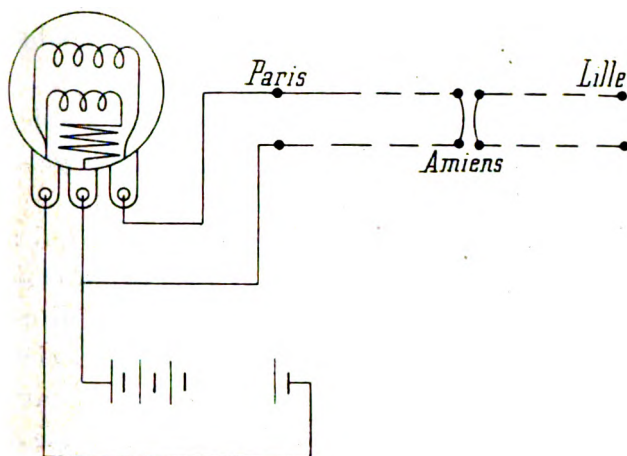


Fig. 4. — Indicateur téléphonique.

geant de montage et disposant la magnéto entre l'appareil et la terre (¹).

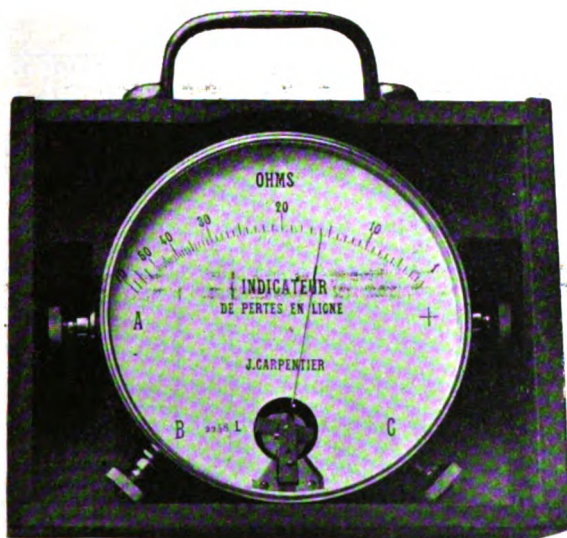


Fig. 5. — Indicateur de pertes.

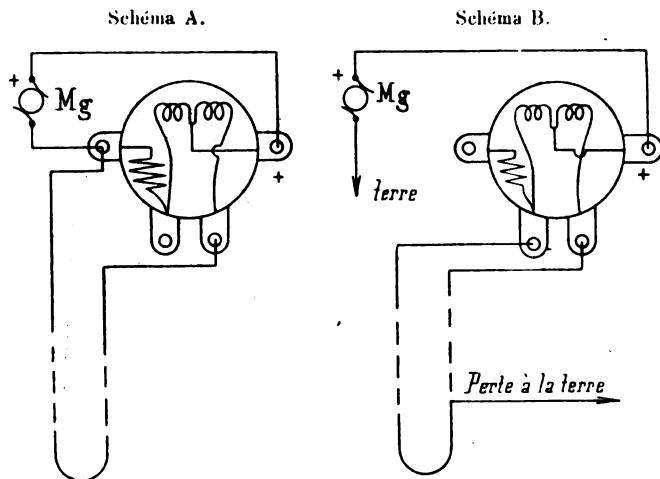
» Comme répéteur à distance ou comme transmetteur d'ordres,

(¹) C'est ainsi qu'ayant mesuré au moyen du schéma A la résistance de la ligne bouclée, soit R_1 , on réalise le schéma B et l'on mesure une certaine résistance R_2 qui n'est pas

le logomètre peut donner lieu à de nombreuses variétés d'appareils. Un des principaux avantages qu'il présente dans ce cas sur les appareils élémentaires (ampèremètres ou voltmètres), parfois employés, c'est de donner des indications indépendantes de la tension d'alimentation dans des limites très étendues, et de présenter, moyennant une dépense de courant convenable, une force directrice considérable d'où résultent une grande précision d'indication et une grande sécurité.

» Je dirai un mot à ce propos de l'application qui a été faite de notre appareil pour compléter les réducteurs commandés à distance de la Société industrielle des Téléphones. Il est possible, en effet, grâce aux dispositifs employés par cette Société, de commander, depuis la station centrale, le réducteur de batterie d'une sous-station très éloignée. Chaque fois qu'on ferme un circuit

la résistance X_2 , cherchée jusqu'au défaut, mais une certaine fonction de X et de R_1 . On déterminera alors directement X par une méthode graphique en tenant compte que l'équation qui relie R_1 , R_2 et X_2 peut se mettre sous la forme d'une somme algè-



brique de trois logarithmes qu'on égale à zéro. Dans ces conditions, si l'on porte les valeurs de R_1 , de R_2 et de X sur trois échelles parallèles à graduation logarithmique, on pourra faire en sorte que toutes les valeurs correspondantes soient en ligne droite. On voit qu'avec une semblable abaque, il suffit pratiquement de connaître deux de ces quantités, soit R_1 et R_2 données par les deux premières mesures, pour déterminer la troisième, soit X , en appliquant une réglette transparente sur l'abaque et faisant passer la ligne repère par les valeurs de R_1 et de R_2 . Cette ligne coupe X au point cherché.

par un bouton poussoir, le réducteur avance d'un plot à quelques kilomètres de là. On conçoit que le complément d'un tel système est un répéteur reproduisant au tableau de la station centrale l'image du réducteur et indiquant sur quel plot il fonctionne à un instant quelconque. Disposons alors entre les plots du réducteur des résistances convenables et branchons un logomètre conformément au schéma de la figure 6. Nous obtenons ainsi à l'usine

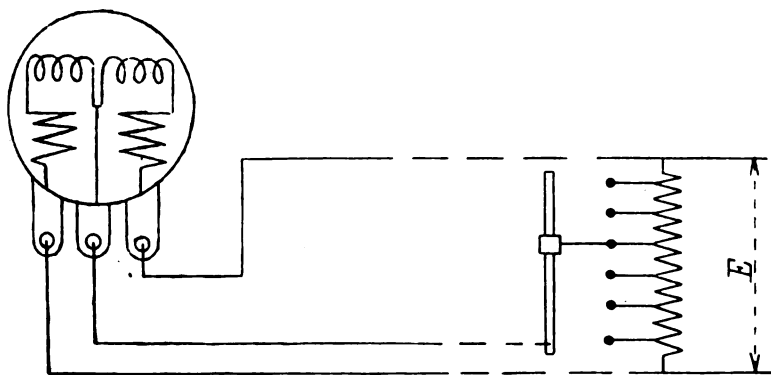


Fig. 6. — Indicateur de plots.

un témoin qui indiquera sur quel plot se trouve à tout moment le réducteur de la sous-station.

» A l'instigation de MM. Otto et Pierre Postel-Vinay, nous avons eu l'occasion d'appliquer le logomètre à l'indication et à l'enregistrement à distance du niveau de l'eau dans un réservoir. Si l'on suppose, en effet, qu'un flotteur avec chaîne et contre-poids commande, par la rotation d'une roue dentée et d'une vis sans fin, le déplacement d'un curseur sur un rhéostat disposé à l'extrémité d'une ligne, et si, à l'autre extrémité de la ligne, on branche un logomètre conformément au schéma de la figure 7, on obtiendra des indications qui ne dépendront que de la hauteur du niveau d'eau; l'appareil pourra être gradué directement en mètres de hauteur; s'il est enregistreur, il tracera le diagramme du niveau de l'eau dans le réservoir. La source électrique utilisée peut être une batterie de piles ou d'accumulateurs et mieux encore un réseau à courant continu ou alternatif. Pour obtenir une graduation proportionnelle, on agit sur la loi de déplacement du curseur du rhéostat en introduisant entre lui et la roue dentée

un système de bielle et manivelle convenablement déterminé.

» Dans les conditions normales de l'appareil, la résistance de la ligne peut atteindre 700 à 800 ohms; cette résistance pourrait d'ailleurs être facilement augmentée. On voit donc que la ligne nécessaire au fonctionnement de l'indicateur ou de l'enregistreur de niveau est peu coûteuse si la distance à franchir n'est pas

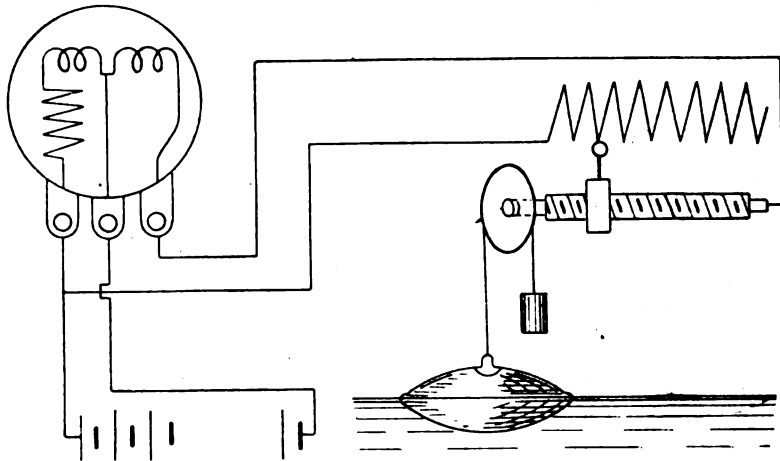


Fig. 7. — Indicateur de niveau.

exceptionnelle. On peut d'ailleurs, dans certains cas, éviter une des deux lignes en adoptant le retour par la terre.

» L'enregistreur que vous voyez ici en fonctionnement (*fig. 8*) est réglé pour une course totale du flotteur de 5 m, ses résistances sont prévues pour une tension de régime de l'ordre de 110 volts (cette tension pouvant d'ailleurs baisser jusqu'à 50 volts sans inconvénient).

» Une particularité intéressante de cet enregistreur est sa disposition générale qui permet d'obtenir des ordonnées rectilignes, le papier étant guidé dans un couloir cylindrique dont l'axe coïncide avec celui de l'équipage. On utilise ainsi 90° de déviation et l'on peut employer une aiguille plus courte que dans les enregistreurs ordinaires, ce qui est un avantage. D'autre part, l'axe de l'équipage étant vertical, la quantité d'encre plus ou moins grande que contient la plume n'influe pas sur l'indication de l'appareil. Enfin, il n'y a pas à faire, pour changer la feuille, la manœuvre un peu délicate de l'enroulement sur un tambour. Le diagramme

se dégage de l'appareil au fur et à mesure qu'il est tracé. Quant à l'introduction de la nouvelle feuille, elle se fait aussi simplement que celle d'une lettre à la poste.

» Mais, revenons au logomètre. Si, au lieu de le connecter à un

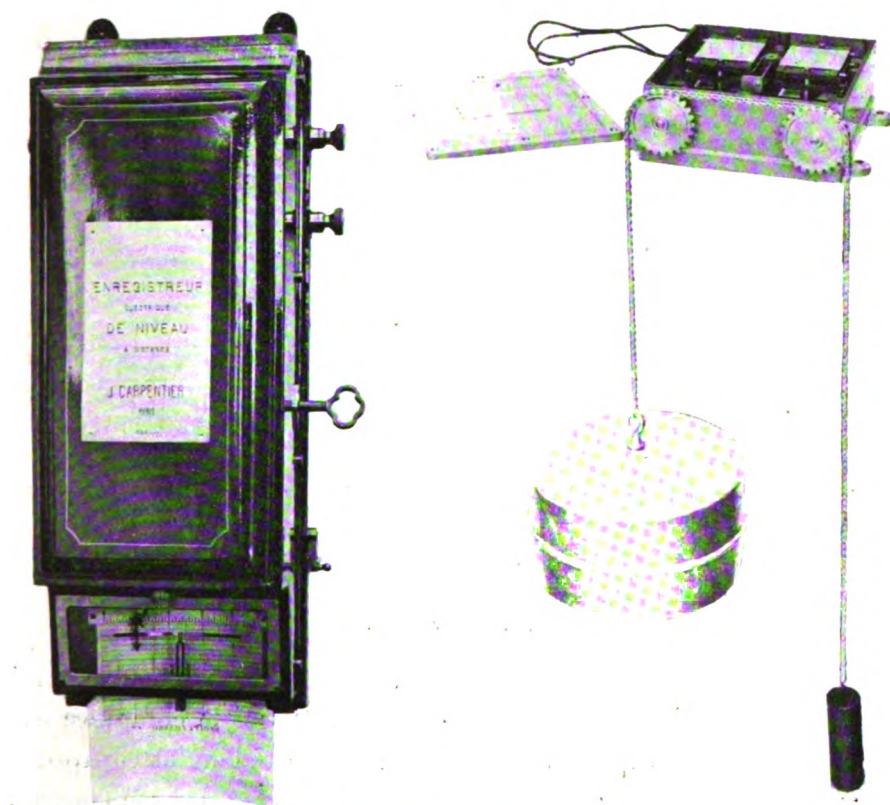


Fig. 8. — Enregistreur de niveau.

rhéostat variable comme dans l'application précédente, nous l'employons à indiquer ou à enregistrer à distance les variations que subit une résistance de platine lorsqu'elle est chauffée (*fig. 9*), nous obtenons un pyromètre à résistance dont le principal intérêt est de se prêter très facilement à l'enregistrement à cause de la force directrice considérable qu'il met en jeu. Vous savez tous, Messieurs, quelles difficultés on'a rencontrées dans l'enregistrement des hautes températures à distance avec les pyromètres à couple thermo-électriques. Malgré les progrès considérables faits dans cette voie, on dispose généralement d'appareils précis, sans doute, mais un peu délicats au gré des industriels qui les utilisent, et

cela en raison même de la faible force électromotrice mise en jeu dans les couples auxquels on doit s'adresser pour résoudre le problème. A ce point de vue, le logomètre, en faisant appel au courant d'un réseau ou d'une batterie, trouve sans difficulté la puissance désirable.

» L'appareil que vous pouvez voir en fonctionnement (*fig. 10*)

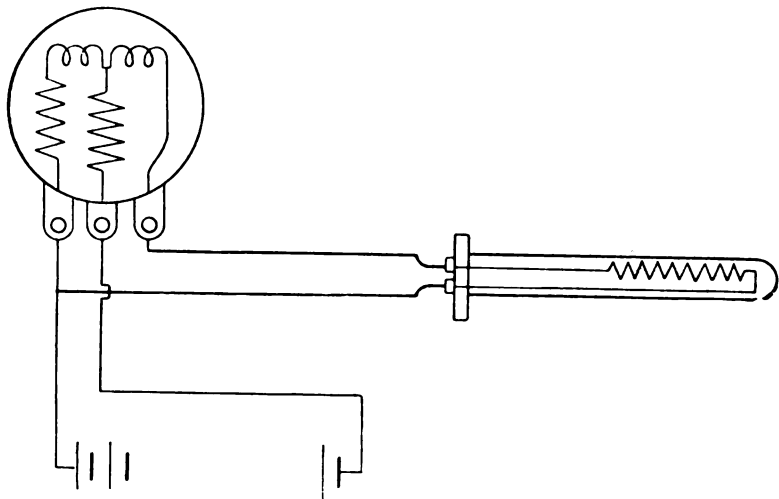


Fig. 9. — Pyromètre.

est un enregistreur dont l'ordonnée maximum correspond à 900° d'élévation de température. La canne qui le complète est du modèle de celles que construit la maison Poulenc et comporte essentiellement une bobine en fil de platine noyée dans le quartz. Malgré les qualités de cette canne, je puis bien vous dire que je regrette de n'en avoir pas d'autres à vous présenter ce soir : j'aurais souhaité, en effet, pouvoir vous dire aujourd'hui ce que nous réservent les résistances en fils réfractaires (tantale, tungstène, etc.) noyées dans le quartz, que nous avons demandé à la maison Poulenc d'établir pour notre appareil et qu'elle mettra sans doute au point à bref délai. Il y aura peut-être là une extension intéressante des limites des températures mesurables.

» Pour en finir avec les applications qui reposent sur la mesure d'une résistance, je vous signalerai encore le salinomètre enregistreur. M. Otto nous a demandé, par exemple, d'appliquer le logomètre à l'enregistrement de la concentration d'une eau en

sulfate d'alumine. Le résultat de nos essais nous permet de penser qu'un semblable enregistreur de concentration des disso-

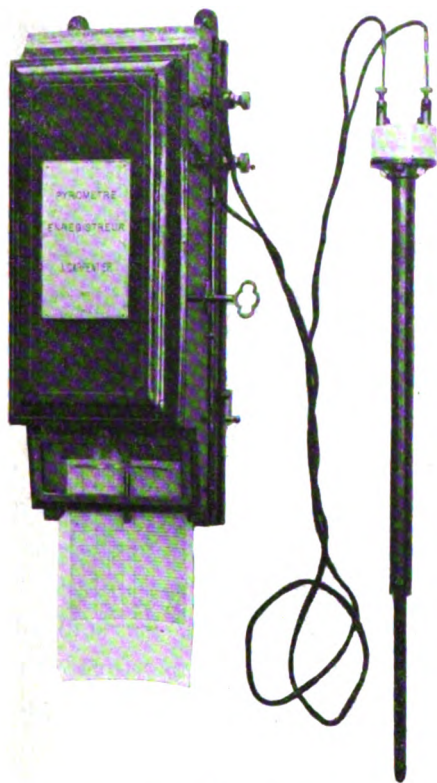


Fig. 10. — Enregistreur pyrométrique.

lutions salines s'appliquerait avec succès dans bien des fabrications chimiques. Il suffit, en effet, de faire passer la dissolution à étudier dans un élément de tuyau muni de deux électrodes isolées entre lesquelles on applique une tension alternative. On peut alors obtenir le diagramme de la concentration de la dissolution avec un logomètre enregistreur à courant alternatif monté en ohmmètre sur la résistance variable du liquide entre les électrodes. L'influence de la température, importante dans la plupart des cas, peut être compensée, en général, par un rhéostat muni d'un nombre de touches convenables (une touche par degré par exemple) et manœuvré à la main de temps en temps d'après les indications d'un thermomètre voisin des électrodes. Cette correction de la température est particulièrement peu importante et peu gênante

dans le cas des dissolutions formées avec l'eau d'une distribution de ville et gardant la température presque constante de cette distribution.

» Messieurs, en montrant ainsi par quelques exemples les applications auxquelles peut donner naissance la mesure ou l'enregistrement des variations d'une résistance, nous n'avons examiné qu'un aspect de la question. S'il est vrai, en effet, qu'un appareil mesurant le rapport de deux courants est surtout intéressant en tant qu'ohmmètre, un simple aperçu vous montrera que bien des applications seraient possibles en dehors de ce cas particulier.

- » C'est ainsi que notre regretté collègue M. Hospitalier indiquait jadis une méthode de mesure de la vitesse angulaire basée sur l'emploi d'un condensateur successivement chargé et déchargé par un commutateur fixé sur l'arbre à étudier. Une force électromotrice constante permettait de donner au condensateur une charge déterminée lors de chaque contact. Le courant de décharge moyen, proportionnel au nombre de décharges par seconde donnait donc, dans le cadre d'un galvanomètre, une déviation proportionnelle à la vitesse angulaire. Le seul obstacle à l'emploi pratique de cette méthode est sans doute l'absence de source d'électricité suffisamment constante pour que la vitesse reste

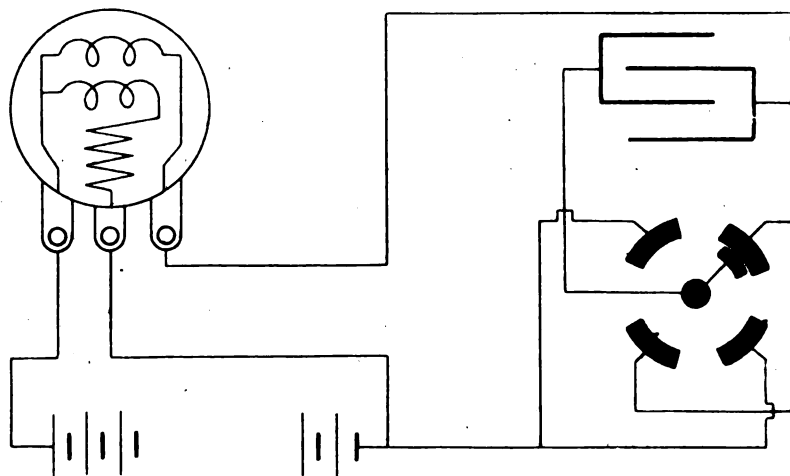


Fig. 11. — Indicateur de vitesse.

la seule variable du problème. Mais prenons un logomètre (*fig. 11*), dont un des cadres reçoit les décharges, tandis que l'autre est

alimenté par la même source à travers une résistance fixe et nous voici indépendants de la tension dans la plus large mesure. Bien entendu, nous n'avons pas non plus à redouter la désaimantation de l'aimant reprochée parfois aux tachymètres électriques ou magnétiques. Le logomètre pourrait y perdre un peu de sa force directrice mais son étalonnage n'en souffrirait pas.

» Autre exemple, basé sur l'emploi des courants interrompus : Considérons un axe suffisamment long, muni à chacune de ses extrémités, d'un collecteur et d'un balai, les touches conductrices du collecteur étant reliées à l'arbre par exemple (*fig. 12*). Dans un tel système, parcouru par un courant, la proportion des temps de contact et des temps de repos dépend de la torsion de l'arbre et une grande variation de courant du fait de la torsion peut être obtenue en multipliant le nombre des touches du collecteur.

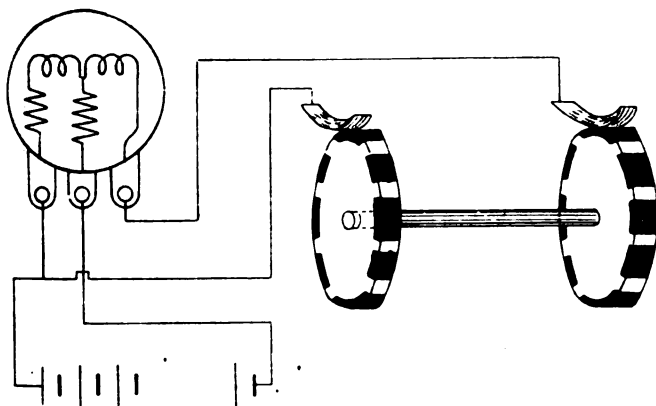


Fig. 12. — Torsionmètre.

Lançons ce courant interrompu dans un des cadres du logomètre, le deuxième cadre étant alimenté par la même source avec une résistance fixe en série, et nous obtenons un torsionmètre électrique indiquant ou enregistrant à distance le couple transmis par l'arbre étudié.

» Ces deux exemples vous montrent qu'on peut appliquer le logomètre en dehors de la mesure des résistances. On peut dire, en effet, d'une façon générale, que lorsqu'un phénomène est susceptible de faire varier le courant produit par une source quelconque d'électricité, le logomètre se prête à l'étude de ce phénomène, indépendamment de la tension de la source et cela dans

des conditions de force directrice permettant l'enregistrement.

» Avant de passer aux applications de la troisième catégorie, qui concernent plus spécialement le courant alternatif, je vous dirai un mot de l'utilisation du logomètre dans le couplage des machines à courant continu ou alternatif. Avec ses deux cadres, le logomètre peut jouer le rôle d'un voltmètre différentiel et permettre d'apprécier l'égalité de deux tensions (supposées en phase dans le cas du courant alternatif) En dépensant un courant convenable, on peut lui donner toute la puissance et partant toute la sécurité désirables et l'utiliser pour produire un contact le cas échéant. A ce propos, je vous signalerai les résultats intéressants qu'on obtient comme relais lorsqu'on inverse le courant des deux cadres par rapport au champ et qu'on réalise, avec l'équipage maintenu entre deux butées de contact, le cas de l'équilibre instable. Une analyse facile montre qu'on obtient dans ce cas un appui de contact très important et un fonctionnement très sûr.

» Si vous jetez les yeux sur le fréquencemètre qui vous indique ici la fréquence du secteur de la Rive Gauche, vous reconnaîtrez encore notre logomètre augmenté simplement d'un condensateur.

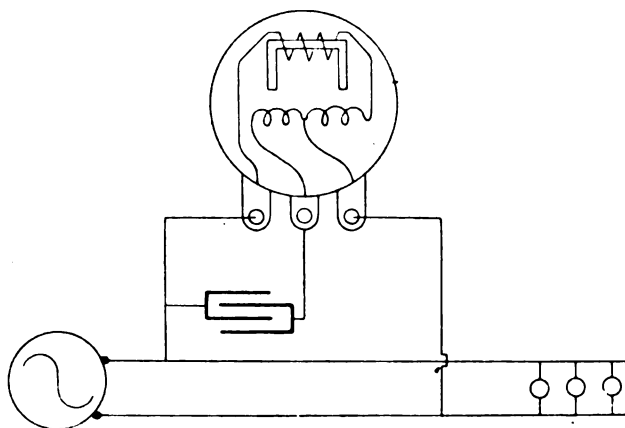


Fig. 13. — Fréquencemètre.

L'électro de champ est en série avec un des cadres, le condensateur en série avec l'autre. Ces deux circuits, mis en parallèle sur le réseau, sont le siège de deux courants décalés sensiblement de 180° et qui varient avec la fréquence de façon inverse (*fig. 13*).

Ainsi disposé, l'appareil indique la fréquence et reste absolument insensible aux variations de tension de 50 à 200 volts. Son échelle est légèrement resserrée vers les valeurs élevées, ce qui est une condition favorable pour la précision des mesures. L'influence des harmoniques du réseau est négligeable ; car, bien que le courant qui passe dans la dérivation du condensateur présente ces harmoniques renforcées, l'action moyenne qu'exerce sur elles le champ sinusoïdal fourni par l'électro est pratiquement nulle. Sous 110 volts l'appareil consomme moins de 0,025 ampère. Le modèle que vous avez sous les yeux est gradué de 25 à 65 périodes : suivant l'entrefer l'échelle peut être plus étendue ou plus restreinte (*fig. 14*).

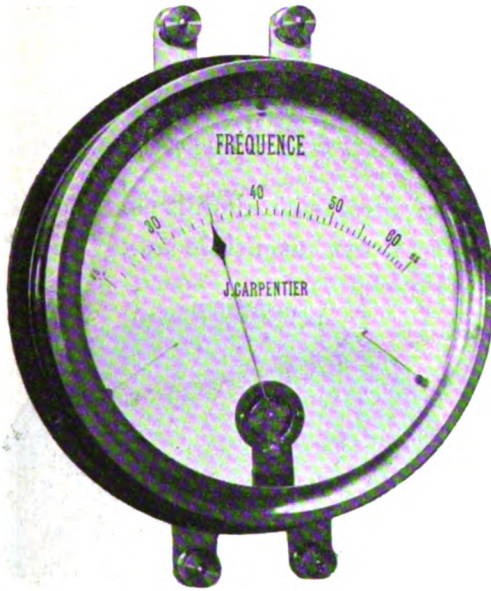


Fig. 14. — Fréquencemètre.

» Mais simplifions encore l'appareil et supprimons même le condensateur. Voici le logomètre réduit à sa plus simple expression (un électro et deux cadres) et devenu de ce fait un phasemètre (*fig. 15*). Dans le cas du modèle triphasé que vous avez sous les yeux, l'électro est mis en série dans une phase : les deux cadres, partant de cette phase, vont rejoindre respectivement chacune des deux autres phases par l'intermédiaire d'une résistance appropriée à la tension. L'appareil, ainsi disposé et muni de l'entrefer normal, indique jusqu'à 30° d'angle de décalage de part et d'autre

du zéro qui est au milieu de l'échelle (fig. 16); il est pratiquement indépendant de la tension et fonctionne dans de bonnes

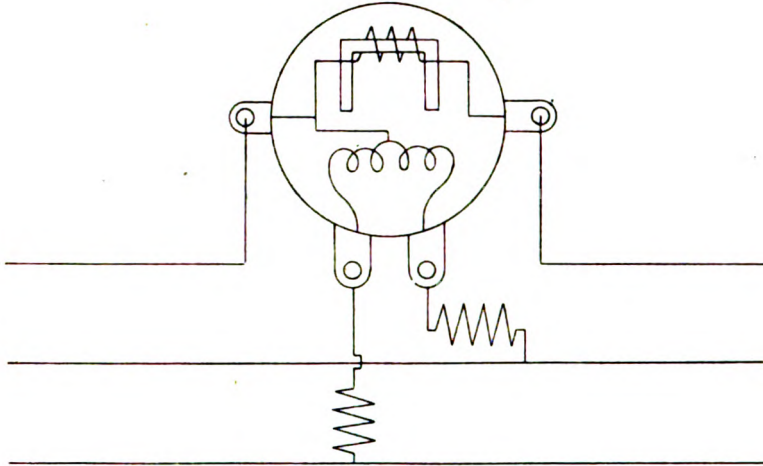


Fig. 15. — Phasemètre.

conditions de force directrice depuis le $\frac{1}{3}$ environ du courant maximum. De plus, il est insensible aux variations de fréquence

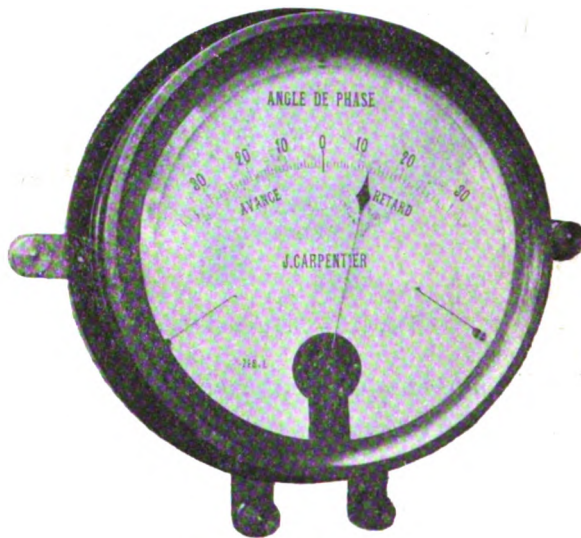


Fig. 16. — Phasemètre.

d'un réseau. Quant à la sensibilité, elle peut être poussée beaucoup plus loin en formant une étoile au lieu d'un V et connectant les deux cadres au point neutre. On arrive ainsi à réaliser un phase-

mètre donnant toute sa déviation pour 5° de part et d'autre du zéro ⁽¹⁾. »

M. le PRÉSIDENT fait remarquer que le logomètre constitue une nouvelle manifestation de l'ingéniosité si connue de la Maison Carpentier, et remercie M. Joly d'avoir montré la fertilité des applications de cet appareil.

(¹) La théorie rend compte de ces différents résultats. L'équation d'équilibre du logomètre se trouve, en effet, modifiée dans le cas du phasemètre par suite de l'intervention du décalage entre les courants qui circulent dans les cadres et le champ qui agit sur eux. Si l'on désigne par φ_1 et φ_2 les décalages des deux courants I_1 et I_2 avec les champs H_1 et H_2 correspondants, on a

$$I_1 H_1 \cos \varphi_1 = K I_2 H_2 \cos \varphi_2.$$

Comme I_1 et I_2 sont tous deux proportionnels à la tension, on voit que l'influence de ce facteur disparaît et qu'il reste

$$\frac{\cos \varphi_1}{\cos \varphi_2} = K \frac{H_2}{H_1} = K' f(x),$$

et cela indépendamment du courant qui alimente l'électro.

Mais le rapport $\frac{\cos \varphi_1}{\cos \varphi_2}$ ne dépend que du décalage φ à mesurer.

Il reste donc $\varphi = F(x)$ c'est-à-dire que la déviation de l'équipage n'est fonction que du décalage à mesurer.

Quant à la variation de la sensibilité avec la valeur de la résistance qui joint l'électro au point commun des cadres, on s'en rend compte facilement d'après les diagrammes obtenus dans les différents cas. On voit ainsi que la sensibilité augmente continuellement lorsque, partant de la valeur 0 pour le montage en V, cette résistance croît jusqu'à devenir égale ou même supérieure à celles des deux autres branches de l'étoile.

LES COMPTEURS ÉLECTROLYTIQUES.

M. HATFIELD. — « Il est évident que l'avenir de l'éclairage électrique dépend de la lampe à filament métallique, au moyen de laquelle il est possible d'éclairer les petites habitations par l'électricité à un prix guère plus élevé, et d'une manière bien plus hygiénique, que par le gaz.

» Beaucoup de centrales électriques se trouvent néanmoins dans une situation assez difficile. Tous leurs clients se servent de lampes à filament métallique, et consomment, par conséquent, moins d'électricité. Cette perte de recettes disparaîtrait sans doute bien vite, en raison de l'augmentation rapide du nombre de consommateurs : il est certain que, par la suite, la lampe à filament métallique sera d'un grand avantage pour les centrales. Mais, pour le moment, la diminution de recettes est considérablement accrue, peut-être même doublée, par les défauts que présentent certains compteurs, qui, construits pour le débit des lampes à filament de charbon, n'enregistrent bien souvent pas la moitié de la consommation réelle.

» Or, il est très important de pouvoir étendre le nombre des consommateurs : un moyen de retirer de nouveaux bénéfices serait de diminuer les frais de premier établissement des nouvelles installations, en se servant d'un compteur capable d'enregistrer les débits les plus faibles, sans demander beaucoup de frais d'entretien.

» Pour ces derniers, les compteurs actuels demandent des frais de réparation et d'étalonnage compris entre 2 fr et 5 fr par an et par compteur, c'est-à-dire presque un quart de la recette de la plupart des petits consommateurs.

» Il est d'ailleurs bon de gagner la confiance des abonnés, et les fréquentes revisions des compteurs sont, pour les petits bourgeois et les ouvriers, une cause de méfiance.

» Il n'est donc peut-être pas sans intérêt de vous montrer un nouveau compteur, d'un système assez ancien, mais qui n'était pas suffisamment perfectionné jusqu'à présent pour être pratique. C'est

le compteur électrolytique *Stia*, dont la lecture se fait par l'observation du volume de mercure séparé par le courant.

» Le premier savant qui a construit un voltamètre à mercure fut le professeur russe Lenz. Edison, qui a inventé le système de distribution d'électricité dont nous nous servons partout, fut le premier qui employa un compteur électrique; il construisit d'abord un voltamètre à cuivre, ensuite un compteur à zinc; il prit des brevets pour les compteurs à mercure, mais il ne réussit jamais à créer un instrument pratique.

» Beaucoup plus tard, les inventeurs anglais Anders, Kottgen et McKenna ont essayé de nouveau de construire un compteur à mercure; ils ont donné à l'instrument la forme droite et verticale qu'il a aujourd'hui, avec cellule d'électrolyse au-dessus d'un tube de lecture. Néanmoins, ils n'ont pas réalisé la méthode de ramener à zéro en renversant la cellule de manière que le mercure amassé dans le tube de lecture s'écoule dans la chambre d'anode.

» C'est l'anglais Arthur Wright qui a vraiment créé un compteur à mercure utile, c'est-à-dire un compteur capable de fonctionner parfaitement pendant un an ou deux : il a réalisé les conditions physiques pour qu'une électrolyse continue et précise puisse avoir lieu; mais il fallait encore une étude approfondie des conditions chimiques pour construire un compteur qui soit à même de conserver sa précision pendant un grand nombre d'années. Nous nous sommes consacrés à l'étude de ce problème et nous espérons vous démontrer que notre compteur n'a pas les défauts connus des compteurs à mercure Wright et autres. Ce compteur perfectionné a reçu le nom de *Stia*.

» La figure 1 représente une section de la cellule électrolytique et un schéma des connexions du compteur *Stia*, type H, c'est-à-dire du compteur qui est appelé à être employé le plus souvent. Le voltamètre proprement dit se compose d'un vase en verre complètement fermé. L'anode A est formée par du mercure qui se trouve dans une rigole circulaire. La cathode est formée d'une plaque en iridium K. L'électrolyte se compose d'une solution aqueuse d'iodure de potassium mercurieux.

» Comme vous le voyez, cette cellule est toute petite : elle contient 10 cm³ d'électrolyte et 60 g de mercure. Il n'y a aucune

raison de craindre qu'un si petit récipient se casse par suite des chocs subis à l'usage normal.

» Lorsqu'un courant traverse la cellule, la quantité de mercure qui se dissout à l'anode et la quantité de mercure qui se sépare à

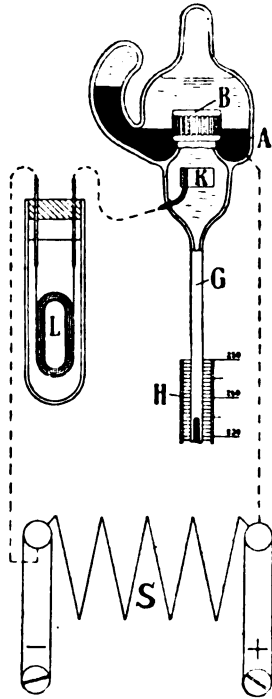


Fig. 1.

la cathode sont exactement égales. D'après la loi de Faraday, la quantité de mercure séparée donne la mesure exacte du courant qui a traversé la cellule. Le mercure qui se sépare n'adhère pas à la cathode, car le métal iridium ne s'amalgame pas avec le mercure, lequel, dans ces conditions, tombe en gouttes et s'accumule dans le tube gradué G, muni d'une échelle. On peut lire le volume de mercure libéré par le courant; et, lorsque le tube de lecture G est plein, il suffit de renverser l'appareil pour que le liquide retourne à la chambre d'anode. Pour le fonctionnement continu du compteur, il est nécessaire de maintenir le niveau de l'anode exactement constant. Wright s'est servi d'un dispositif bien connu ailleurs pour des buts analogues et qui fonctionne dans ces conditions avec une grande exactitude. C'est le tube de ré-

serve V (*fig. 2*), rempli de mercure au commencement, qui fonctionne d'une manière analogue aux petits récipients d'eau qu'on fixe aux cages des oiseaux. Lorsque le niveau de l'anode s'abaisse au-dessous du trou de communication, un peu d'électrolyte coule en haut dans le tube V et la même quantité de mercure vient à l'anode, et élève son niveau.

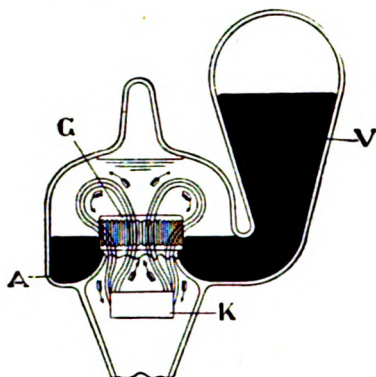


Fig. 2.

» Ce niveau est à la hauteur de l'arête de la rigole A. Pour que le mercure ne soit pas projeté par dessus le bord de la rigole, par les faibles trépidations auxquelles un compteur en service est toujours exposé, on a muni le bord de la rigole d'une barrière formée de tiges en verre qui laissent passer facilement le liquide, mais empêchent complètement que le mercure soit projeté en dehors.

» En pratique, on ne fera pas passer le courant total dans le voltamètre à mercure, mais on se servira d'un shunt. Le courant principal à mesurer traverse une faible résistance S (*fig. 1*) sur laquelle le voltamètre ABC est monté en parallèle par l'intermédiaire d'une forte résistance L. En pratique, on choisira les résistances des deux circuits de telle manière que $\frac{1}{100}$ seulement du courant total traverse le voltamètre. Par conséquent il suffit que la cellule puisse supporter un courant de $\frac{1}{10}$ ampère, fait qui rend possible la construction d'un compteur de ce genre à un prix modique.

» Vous voyez que le compteur se compose de très peu de parties constitutives; il faut examiner plus minutieusement les conditions nécessaires pour en obtenir un fonctionnement satisfaisant.

» Pour que le compteur marque toujours exactement, il est nécessaire qu'il existe une proportionnalité exacte à toutes les charges et températures entre le courant principal et le courant dérivé. Cela n'est réalisé qu'à condition que la résistance du circuit reste bien constante et que, dans le voltamètre, il ne se produise pas de force contre-électromotrice pendant le passage du courant. La résistance S peut facilement être établie de manière à posséder un coefficient de variation très faible et pratiquement négligeable. Il en est autrement du circuit formé par le voltamètre et la résistance L montés en série. Pour obtenir ici une indépendance complète de la température, la résistance L est établie avec de la manganine et du fil de nickel pur de manière que son coefficient de température soit exactement l'inverse du coefficient de température du voltamètre : la résistance totale reste ainsi constante.

» Une autre source d'erreur réside dans la production d'une force contre-électromotrice dans le voltamètre au moment du passage du courant. Mais, comme il ne se produit pas de décomposition de l'électrolyte dans le voltamètre pour les intensités admissibles, on n'a à tenir compte que de la faible force contre-électromotrice résultant des variations de concentration de l'électrolyte autour des électrodes.

» Pendant le passage du courant, du mercure est dissous à l'anode et une quantité égale est rejetée à la cathode. Il s'ensuit que la solution devient spécifiquement plus lourde à l'anode et spécifiquement plus légère à la cathode, quoique la quantité totale de mercure dans la solution reste invariable. Pour compenser ces différences de concentration nuisibles, on a imaginé le dispositif de circulation suivant (*fig. 2*) :

» La cathode K est placée sous l'anode A formée par l'anneau de mercure. Cet anneau repose dans une rigole en verre dont le bord dépasse à peine la surface du mercure. Or, dès que, sous l'effet du passage du courant, la solution devient spécifiquement plus lourde au-dessus du mercure, elle s'écoule du miroir anodique vers le bas, tandis que la solution légère de la cathode remonte. Ce dispositif fait en sorte que les variations de concentration qui se produisent nécessairement restent suffisamment

faibles pour que l'exactitude du compteur n'en souffre nullement.

» Il ne reste plus qu'une partie du compteur dont je n'ai pas encore parlé : le tube de lecture et la manière de lire. Il est évident qu'on peut arranger les rapports entre les résistances des circuits, le diamètre du tube de lecture et les graduations de l'échelle de façon que l'ascension du mercure mesure les ampères-heure et, pour une tension constante, les hectowatts-heure qui passent dans le circuit principal. Lorsque le tube est rempli de mercure, il suffit de le faire basculer jusqu'à ce que le mercure soit retourné dans le réservoir anodique. Il faut choisir l'instrument selon qu'on désire qu'il mesure la consommation totale en quelques heures, en quelques jours ou en quelques semaines. Lorsque la quantité de mercure séparé remplit un espace de 50 mm à 100 mm du tube de lecture, on peut, sans difficulté, évaluer la consommation totale avec une exactitude de 0,5 pour 100. Pour mesurer le courant fourni pendant quelques heures à une batterie d'accumulateurs, il faut que le compteur enregistre, avec le même courant, beaucoup plus rapidement qu'un compteur de même grandeur désigné pour la vente de l'électricité à une petite usine où les moteurs fonctionnent 10 heures par jour, et où la consommation doit être déterminée tous les mois. C'est pourquoi le compteur électrolytique demande une sorte de graduation d'après sa capacité en hectowatts-heure; le compteur moteur ayant une capacité illimitée, celle-ci est par conséquent sans influence sur le nombre de graduations. Il est évident que le compteur Stia enregistre exactement tout courant qui le parcourt, ce qui est une simple conséquence de la loi de Faraday. Un compteur capable d'enregistrer un courant de 100 ampères enregistre avec sûreté un courant de $\frac{1}{100}$ ampère; tandis que les compteurs moteurs demandent une certaine intensité de courant pour démarrer, et ne commencent l'enregistrement exact qu'à un débit d'au moins $\frac{1}{10}$ ou $\frac{1}{20}$ de la pleine charge. Or, dans la plupart des canalisations, il faut installer un compteur capable de supporter une charge plusieurs fois plus grande que les débits quotidiens; dans une maison, par exemple, il est possible, mais il arrive rarement qu'on allume toutes les lampes simultanément. Un compteur Stia supporte une très

grande surcharge sans que cela lui fasse le moindre tort, tout en enregistrant avec exactitude la consommation d'une lampe à filament métallique; la conséquence est qu'un seul modèle, celui de 10 ampères, répond à tous les besoins dans 90 pour 100 des installations. C'est ainsi que le nombre de compteurs que les centrales doivent avoir en magasin peut être considérablement réduit.

» Les divers types de compteurs Stia se distinguent en principe par le tube de lecture. Le plus petit a un tube de lecture de 9^{cm}; l'échelle comporte 125 divisions. Le type n° 2 a un tube de 25 cm et 250 divisions. Le type n° 3 a l'équivalent de 1000 mm d'échelle. Ainsi que je l'ai déjà exposé, on peut calculer les parties constitutives du compteur pour donner une valeur quelconque (dans certaines limites) à chaque division de l'échelle. La capacité du compteur est le produit du nombre des divisions de l'échelle et de la valeur de chaque division. L'exactitude de la mesure ne dépend nullement de ce dernier chiffre : pour donner une grande capacité à un compteur, nous pourrions, par exemple, donner à chaque division de l'échelle la valeur de 10 kilowatts-heure. A première vue, il semble qu'une mesure exacte ne soit pas possible avec un tel compteur. Mais, si la quantité de mercure séparée par le courant qu'il faut mesurer avait passé la centième division de l'échelle, il serait facile d'évaluer la consommation avec une exactitude de 0,5 pour 100. Des erreurs bien plus grandes sont fréquentes avec tous les autres compteurs. Avec un compteur moteur, nous pourrions lire sans doute des dixièmes et des centièmes de kilowatt-heure; mais ces chiffres n'auraient absolument aucune signification : ces cadrans pour fractions de kilowatt-heure ont une influence nuisible sur le fonctionnement du compteur et ne servent qu'à rendre possible l'étalonnage rapide et convenable du compteur. Si l'on veut, on peut obtenir d'une autre façon le même résultat pour les compteurs Stia, mais il est évident que la nécessité d'un fréquent étalonnage n'est plus nécessaire avec ces appareils dont l'exactitude ne varie ni avec le temps, ni par l'usage, ni pour aucune autre raison.

» Il est évident qu'on peut construire un compteur pour enregistrer avec une lenteur quelconque; il suffit d'augmenter la rési-

stance du circuit dérivé où se trouve la cellule. Si nous doublons cette résistance, chaque division de l'échelle est doublée en valeur pour le même courant : le mercure se sépare moitié moins vite. De même, nous pouvons réduire la résistance du shunt, ce qui offre l'avantage de diminuer la chute de tension. S'il s'agit de construire un compteur qui enregistre plus vite, nous pouvons diminuer la résistance du circuit dérivé et augmenter celle du shunt. Chacun de ces procédés a une limite. Il est impossible de construire une cellule ayant une résistance inférieure à 1 ohm; elle deviendrait beaucoup trop grande et trop fragile et, pour compenser les changements de température, il faut que la résistance du métal pur soit 3,3 fois plus grande que celle de la cellule. En pratique, on ne peut pas admettre une trop grande chute de tension, c'est-à-dire d'énergie dans le compteur.

» Nous avons dit qu'il y a une limite pour les tubes de lecture. Pour que le mercure coule vers le bas lorsqu'on fait basculer la cellule, il est nécessaire que le diamètre du tube ne soit pas inférieur à une certaine dimension, mais nous avons imaginé un nouveau tube qui permet de diminuer beaucoup ce diamètre.

» Il est possible de construire aujourd'hui des compteurs qui, avec une chute de tension de 0,5 volt à plein débit, donnent 100 mm de mercure sur l'échelle en quelques heures.

» Voici les trois types de compteurs pour canalisations pour lesquels il est nécessaire de relever mensuellement la consommation. Le compteur Stia, type U (*fig. 3*), est très petit et son prix est fort minime; il a une échelle de 125 divisions. Le compteur Stia, type H (*fig. 4*), est plus grand et plus exact que le type U; son échelle a 250 divisions de 1 mm. Les compteurs Stia sont étalonnés avec une exactitude garantie de 3 pour 100. Mais on peut construire des instruments de précision qui ont une exactitude de 0,5 pour 100.

» Pour construire un compteur qui puisse enregistrer longtemps sans qu'il faille le faire basculer, Wright a imaginé un tube de lecture à siphon, dont le compteur Stia, type F est muni. Le tube gradué dans lequel le mercure tombe en partant de la cathode est formé d'un siphon de 100 divisions. Lorsque le siphon est rempli, il se vide de lui-même dans la partie inférieure du tube où l'on peut lire les centaines jusqu'au nombre 1000.

» On peut désigner tous ces compteurs sous le nom de *compteurs à marche lente*. S'il s'agit, au contraire, de mesurer la charge d'une batterie d'accumulateurs, on ne pourrait se servir de l'un des



Fig. 3.

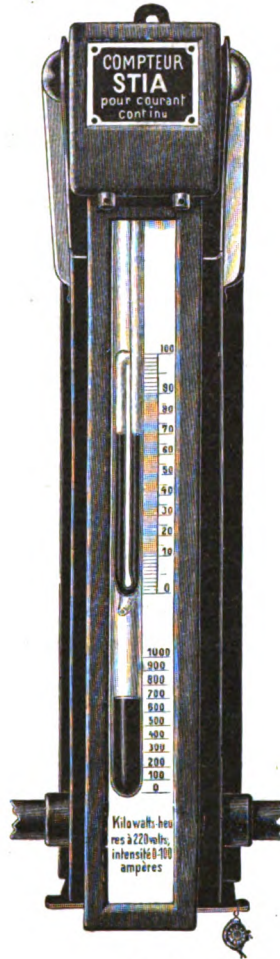


Fig. 4.

types précités : il faut qu'un compteur de ce genre mesure avec exactitude la consommation pour chaque charge. La durée d'une batterie d'accumulateurs dépend du traitement qu'on lui fait subir et il est absolument nécessaire de mesurer les courants de charge et décharge si l'on veut que la batterie soit constamment en bon état. Ces courants circulant en sens opposés, on doit se servir d'un appareil de commutation lorsqu'on emploie un compteur-moteur. Un dispositif simple permet de construire un compteur Stia avec

deux tubes dont chacun enregistre la consommation lorsque le courant passe dans l'un ou l'autre sens.

» Nous avons dit que le courant ne produit aucune décomposition chimique lorsqu'il traverse une cellule et que, par conséquent, il n'engendre pas de force contre-électromotrice. Mais ceci n'est vrai que quand le mercure forme l'anode et la plaque d'iridium la cathode, c'est-à-dire lorsque le fonctionnement est normal. Si nous faisons passer le courant dans la direction opposée, nous décomposons la solution. L'iode arrive à l'iridium et se décharge, car l'iridium ne forme pas d'ions. Cette décomposition demande une tension d'un demi-volt, et si la tension appliquée à la cellule n'a pas cette valeur minima, il ne passe pas de courant, c'est-à-dire que, si nous envoyons le courant dans un compteur Stia dans une fausse direction, et si la chute de tension sur le shunt n'excède pas 0,5 volt, aucun courant ne traversera la cellule. Si la chute de tension excède 0,5 volt, l'iode se séparera dans la cellule. Donc, si nous raccordons au shunt un circuit dérivé contenant une seconde cellule de voltamètre, de façon que le courant y passe en sens inverse de la première, et si la chute de tension n'excède jamais 0,5 volt, chacun des tubes enregistre le courant qui passe dans l'autre direction. C'est ainsi qu'on peut construire un compteur pour accumulateurs sans aucun appareil de commutation.

» Il faut que ce compteur donne un enregistrement assez grand pour mesurer en quelques heures, mais avec la faible chute de tension d'un demi-volt : la résistance des cellules normales serait trop grande, et l'intensité du courant qui passe serait trop faible. Pour supprimer cet inconvénient, nous nous sommes servis d'une cellule qui est composée de trois cellules normales raccordées en parallèle, qui laissent couler le mercure dans un tube commun de lecture. De cette manière, il est possible de construire des compteurs dans lesquels le mercure monte, en 5 heures, de 100 mm dans le tube de lecture, ce qui suffit pour tous les usages normaux des batteries.

» De tous les tarifs préconisés, le tarif double reste le plus simple à comprendre, bien qu'il ne soit pas juste, en théorie.

» Les compteurs moteurs à double tarif ont toujours pour incon-

vénient de présenter de nombreux dérangements accidentels, parce qu'ils sont trop compliqués. Nous avons construit un compteur Stia à tarif double, dans lequel nous avons apporté les plus grands soins à éviter les causes de dérangement. Nous avons choisi une minuterie bien étudiée et nous avons combiné deux tubes de lecture, l'un pour tarif élevé et l'autre pour tarif réduit. Il ne faut remonter l'horloge que tous les trente-cinq jours.

» Le système le plus simple de tarif double permet de changer le tarif des compteurs par relais; le compteur reçoit un petit relais ou électro-aimant qu'on raccorde entre un fil pilote et un des câbles. Au même instant, le tarif est changé à tous les compteurs. Comme vous voyez, le compteur Stia se construit très bien pour ce genre de tarif : les parties mécaniques se réduisent à une simple armature en fer qui est attirée par un électro-aimant : l'armature est placée dans un petit tube de verre et porte des fils en platine qui trempent dans le mercure. Le tube est hermétiquement scellé et l'électro-aimant agit du dehors.

» Enfin, il faut dire quelques mots sur l'étalonnage du compteur Stia. Il est évident qu'il est possible de trouver une formule simple reliant les facteurs divers dont dépend l'enregistrement du compteur.

» Soient :

R la résistance du circuit dérivé, la cellule y compris,

S la résistance shunt,

V la tension pour laquelle le compteur est établi,

G le nombre de grammes de mercure contenu dans le tube de lecture pour chaque division de l'échelle,

A le nombre de kilowatts-heure correspondant à chaque division de l'échelle.

Il est facile de démontrer que :

$$R = \frac{3,726 AS}{V G} - S,$$

car l'ampère-heure sépare 3,726 g de mercure d'un sel mercurique, d'après la loi de Faraday.

» Il est très facile d'étalonner un compteur Stia si l'on mesure les

résistances R et S : pour G , il faut prendre le chiffre donné par le constructeur (c'est comme avec les compteurs-moteurs la relation entre les diverses roues dentées). Mais, il y a un moyen encore plus simple, en se servant d'un compteur Stia étalon : on raccorde les compteurs qui doivent être étalonnés, s'ils ne sont pas trop nombreux, en un circuit quelconque où le courant n'atteint pas une grande intensité : par exemple sur l'éclairage de la centrale ou des bureaux, un moteur de pompe, etc. Il n'est pas nécessaire de mesurer le courant ou de le maintenir constant. Après quelques jours, lorsqu'une quantité de mercure suffisante s'est séparée, on relève les compteurs en les comparant avec l'étalon.

» L'Institut physique technique de l'Empire allemand étalonne les compteurs Stia pour l'Allemagne et a fait imprimer un certificat spécial, dans lequel il est dit que le compteur ne s'altère pas et n'a pas besoin d'un second étalonnage.

» Il n'y a aucune raison de craindre une altération du compteur avec le temps. Cette altération ne pourrait provenir que du changement chimique et il est facile de montrer que les conditions chimiques de la cellule sont stables.

» Si l'on veut reconnaître qu'un système quelconque est en équilibre stable, il faut détruire ses conditions d'équilibre et observer ce qui arrive lorsque cette perturbation cesse. Si l'équilibre est stable, le système retrouvera de lui-même ses conditions primitives d'équilibre.

» La cellule consiste en un nombre d'éléments chimiques combinés d'une certaine façon; quand le courant passe dans le sens normal, il n'y a pas de décomposition chimique, mais si le sens vient à changer, l'électrolyte se décompose en mercure et iode. Si l'état primitif de combinaison est stable, on observera après l'interruption du courant que les éléments se combinent à nouveau. C'est ce qui arrive en fait.

» Du reste, il y a quelque temps, l'Institut physique technique de Charlottenburg-Berlin, voulant être fixé à ce sujet, a délégué un de ses professeurs dans différentes centrales où se trouvaient installés des compteurs depuis 1906, et ce professeur a conclu qu'aucun compteur n'avait subi la moindre altération.

» On a objecté que ce genre de compteurs facilite la fraude, car

il ne reste plus aucun contrôle aussitôt que le tube a été renversé. Nous croyons que ce moyen de fraude ne tarderait pas à être découvert. On peut, par exemple, comparer la consommation avec celle des mois correspondants de l'année précédente, ou encore un des agents principaux de la Compagnie peut passer chez un abonné, soupçonné, quelques jours avant la date fixée pour le relevé du compteur. Enfin n'oublions pas que ces compteurs peuvent être lus par tout le monde (employés, serviteurs, etc.), ce qui donnerait certainement des craintes à l'abonné ayant l'intention de frauder.

» Il y a en service 70000 compteurs, et jamais nous n'avons reçu de réclamation de ce genre.

» Nous osons croire que le compteur Stia pourrait rendre de grands services à l'Industrie électrique. Ainsi que nous l'avons démontré, il est rigoureusement exact et ne nécessite jamais aucun entretien. »

M. le PRÉSIDENT remercie M. Hatfield de la présentation du compteur Stia et des remarquables projections dont il l'a illustrée.

La séance est levée à 10 h 25 m du soir.

NOTE RELATIVE AUX DISPOSITIONS ADOPTÉES PAR LA SOCIÉTÉ SUD-LUMIÈRE
POUR LES TRAVERSÉES DE CHEMINS DE FER ⁽¹⁾.

La Société *Sud-Lumière* se conforme, pour l'établissement de ses ouvrages de traversée de chemin de fer, aux prescriptions de l'arrêté ministériel du 21 mars 1910. Elle a toujours adopté l'interprétation que le Ministre des Travaux publics vient de donner dans sa circulaire à l'appui de cet arrêté, relativement aux coefficients de sécurité à adopter dans le cas de rupture de conducteurs placés d'un même côté : c'est-à-dire, qu'en temps normal, (fils non rompus), l'ouvrage doit présenter dans toutes ses parties une sécurité d'au moins 10, et en cas de rupture de tous les câbles d'un seul côté, une sécurité notablement supérieure à 1.

La Société *Sud-Lumière* n'admet que des supports en fer ou en ciment armé, pour les traversées de ses lignes H. T., excluant les poteaux en bois, à cause des risques spéciaux à la haute tension, en cas d'incendie des supports.

Les traversées en haute tension sont toujours en *câble* de bronze télégraphique, d'au moins 45 kg : mm².

La Société *Sud-Lumière* a adopté comme *Dispositif de Protection*, quand il y a lieu (art. 24, § 3 de l'arrêté du 21 mars 1910), le système décrit ci-dessous. Elle ne propose ce dispositif de protection que pour ses traversées à haute tension.

SYSTÈME DE PROTECTION POUR TRAVERSÉE A HAUTE TENSION. — Le câble de ligne est fixé sur deux isolateurs I₁ et I₂ (art. 25, § 4 de l'arrêté).

Un deuxième câble, dit *câble-porteur*, de même section et métal que le câble de ligne jonctionné à celui-ci tous les mètres, le double dans les traversées, s'attache à l'isolateur I₁ spécial à ce câble, et à l'isolateur I₂ auquel est déjà fixé le câble de ligne.

Sur toute la longueur de la traversée, les jonctions sont de simples ligatures en fil de bronze, mais, aux deux extrémités, les deux câbles sont réunis par un joint Reiss. Ils sont également réunis par un joint Reiss extérieurement à l'isolateur commun I₂.

Système d'attache des câbles aux pylônes du poteau. — Ce système d'attache du double câble sur trois isolateurs montés sur des ferrures indépendantes, donne toute sécurité, car un seul des isolateurs est suffisant pour supporter la double ligne en cas de rupture des deux autres.

Au pis-aller, si les trois isolateurs se brisent, le câble tombe sur le cadre de garde (prévu art. 25 § 5 de l'arrêté), et se met à la terre.

Dans le cas de rupture d'un ou deux de ces isolateurs, la tension du câble correspondant tend à appliquer celui-ci contre l'isolateur intact et n'occasionne, par suite, aucune terre ni interruption du service.

Dans le cas de rupture d'un des câbles (considéré d'ailleurs comme impossible avec le coefficient de sécurité adopté comme il est dit ci-après), il est facile de voir que le brin

⁽¹⁾ Cette Note nous a été adressée à propos de la Communication de M. Brunswick sur les *Règlements administratifs concernant les distributions d'énergie électrique* (voir *Bulletin* de juillet 1910, p. 405).

rompu ne peut jamais entrer en contact avec les fils de télégraphe situés à 2 m au moins au-dessous de la ligne, ni aucun autre objet.

Conditions de pose des câbles. Coefficient de sécurité toujours supérieur à 10. — La tension de pose admise dans chacun des câbles (câble de ligne et câble-porteur) à la traversée, est réduite à la moitié de la tension dans les parties adjacentes, de telle sorte que les appuis en temps normal (câbles non rompus) sont en équilibre et ne subissent *aucune fatigue*.

Cet avantage très important au point de vue de la sécurité de l'ouvrage et de sa durée, n'a d'équivalent dans aucun autre des systèmes généralement adoptés jusqu'ici, que ce soit le filet en U autour des fils d'énergie, ou même le filet en $\cap$ autour des fils de l'Etat.

Ce dédoublement de la tension mécanique conduit, en outre, à ce résultat, qu'en pratique le coefficient de sécurité à la traversée est plus voisin de 15 que de 10, pour *chaque câble* (câble de ligne et câble-porteur).

En effet, par suite des sinuosités du tracé des lignes, on est conduit dans le calcul mécanique de celles-ci (calcul qui ne doit jamais être négligé) à adopter des tensions bien inférieures à celles autorisées par le règlement, qui ne sont applicables qu'en alignement droit.

Pratiquement, on est amené à ne pas dépasser une tension en ligne d'environ 5 à 6 kg : mm² : cette tension est dédoublée à la traversée et descend donc vers 2,5 à 3 kg : mm² dans chaque câble (câble de ligne et câble-porteur); le coefficient de sécurité, par câble, est donc de $\frac{45}{3} = 15$.

On peut donc admettre qu'il n'y a aucun risque de rupture : au surplus, la sécurité est encore *doublée* par la présence de *deux* câbles, ayant des attaches distinctes, se supportant l'un l'autre sur toute leur longueur.

Le coefficient de sécurité pourrait encore être notablement augmenté en adoptant pour les traversées et les parties voisines du câble, du bronze téléphonique de 75 kgs de charge de rupture, au lieu de bronze télégraphique à 45 kgs.

C'est d'ailleurs ce qu'on fera dans les cas assez rares des larges traversées, afin de conserver un coefficient de sécurité supérieur à 10, l'adoption d'une trop faible tension conduisant à des flèches exagérées.

Une autre conséquence heureuse du dispositif précédent est d'exiger des supports d'arrêt de chaque côté de la traversée, beaucoup moins importants, donc plus économiques, que ceux nécessités dans tous les autres cas, à *tension de pose égale*, et ce, notamment dans le cas du filet en U au-dessous des conducteurs d'énergie.

Adoption du dispositif du Sud-Lumière par l'Administration et les Compagnies de Chemins de fer. — Le Service des Télégraphes a adopté depuis deux ans notre double câble aux traversées de toutes ses lignes, tant en Seine qu'en Seine-et-Oise, en remplacement des filets qu'elle exigeait autrefois.

La Compagnie des Chemins de fer d'Orléans, après examen approfondi de notre projet, l'a adopté il y a un an pour trois traversées de ses lignes actuellement existantes, et vient de nous en autoriser une quatrième dans les mêmes conditions.

Nous avons appris officieusement que la Compagnie d'Orléans, consultée au sujet de notre dispositif par la Compagnie du P. L. M. à laquelle nous le proposons, lui a répondu qu'elle le considérerait comme le meilleur.

Nous sommes en rapports, actuellement, avec la Compagnie de Grande Ceinture, qui accepte notre dispositif pour trois traversées de ses lignes.

FILET P. L. M. — Ce filet exige toujours beaucoup de place, ce qui est en contradiction avec le paragraphe 1 de l'article 24 de l'arrêté ministériel du 21 mars 1910, qui engage à effectuer la traversée en un point de moindre largeur de l'emprise des chemins de fer.

En 1908, la compagnie P. L. M. nous avait imposé cette solution à la traversée d'une de ses lignes à Yerres (S.-et-O.), mais elle *a dû y renoncer*, car la nappe télégraphique comporte 40 fils environ et l'établissement d'un ouvrage en Ω autour de cet important réseau exigeait des dimensions telles, tant en largeur qu'en hauteur et longueur, qu'on n'aurait pas pu conserver la dimension du gabarit exigé pour le passage des trains. *Cette objection s'applique à toutes les grandes lignes* des environs de Paris et sans doute d'ailleurs.

Rappelons que le filet en Ω autour des nappes télégraphiques est un obstacle très sérieux aux travaux de réparation ou d'extension de celles-ci. D'autre part, l'isolement ou la mise à la terre du filet ne sont pas par eux-mêmes des protections donnant la sécurité absolue de notre dispositif : l'isolement est la pire des deux solutions, puisque le moindre défaut d'isolement du filet, par rapport à la haute tension, peut amener l'électrocution des ouvriers travaillant sur les lignes télégraphiques à l'intérieur et à proximité immédiate du filet.

La mise à la terre du filet, théoriquement préférable, exige pour le moins *une terre parfaite en tout temps*, condition difficile à réaliser, comme chacun sait. La terre étant supposée bonne, il n'est pas du tout certain que le potentiel au point où se trouve le fil ou l'ouvrier à protéger, soit le même qu'au voisinage immédiat de la plaque de terre.

Enfin si, malgré ces objections, on admet que cette protection est efficace pour les nappes télégraphiques, elle ne l'est pas, à coup sûr, pour les rails, les trains et tous autres objets situés hors du filet.



CORRESPONDANCE.

Paris, le 8 février 1911.

Monsieur le Président de la Société internationale des Électriciens à Paris.

MONSIEUR LE PRÉSIDENT,

Un Congrès international des applications électriques doit avoir lieu, comme vous le savez, à Turin, au mois de septembre prochain. Le Comité italien d'organisation a saisi les présidents des divers Comités électrotechniques de la liste des questions sur lesquelles il désirerait recevoir des rapports préliminaires.

J'ai l'honneur, Monsieur le Président, de vous transmettre la liste de ces questions en vous priant de bien vouloir la communiquer aux membres de votre Syndicat, et en sollicitant leur concours. Les personnes qui accepteront de se charger d'un de ces rapports voudront bien aviser le Président du Comité électrotechnique français, 14, rue de Staël (XV^e), qui fera le nécessaire pour qu'elles soient inscrites sur la liste que doit arrêter prochainement le Comité italien d'organisation.

Veuillez agréer, Monsieur le Président, l'assurance de mes sentiments très distingués.

*Le Président
du Comité électrotechnique français,*

R.-V. PICOU.

CONGRÈS INTERNATIONAL DES APPLICATIONS ÉLECTRIQUES, TURIN 1911.

COMMISSION D'ORGANISATION.

MILAN, Via San Paolo, 10.

*Délibérations préliminaires prises par le Comité d'organisation dans la séance
du 28 décembre 1910.*

1. L'inauguration du Congrès aura lieu en un jour, qui sera fixé ultérieurement, mais qui sera compris entre le 9 et 11 septembre 1911.

2. Pourront faire partie du Congrès toutes les personnes qui, ayant envoyé leur adhésion, auront, en outre, versé leur cotisation de 25 fr avant l'inau-

guration des travaux. Les membres du Congrès jouiront de la faculté d'assister à ses séances, de prendre part aux votes et de recevoir un exemplaire des actes. Les membres de leur famille pourront également assister aux séances du Congrès, participer aux visites, aux excursions et aux réceptions, moyennant une taxe d'inscription de 10 fr par personne, mais n'auront pas droit au vote.

3. De concert avec MM. les Présidents des Comités étrangers électrotechniques et avec MM. les Présidents des Sociétés électrotechniques des États qui ne possèdent pas encore un Comité électrotechnique, la Présidence du Comité d'organisation établira la liste des rapporteurs officiels sur les thèmes du Congrès, dont une copie est annexée aux présentes, et invitera ces Rapporteurs à présenter au Congrès leurs considérations sur les arguments préétablis.

4. MM. les Rapporteurs seront priés de développer les thèmes qui leur seront proposés dans un sens pratique et conforme au caractère du Congrès, et de résumer, aussi objectivement que possible, l'état de questions qu'ils auront à traiter. Une semblable direction qu'on leur indique n'est pas exclusive et ne les empêchera nullement d'exprimer leurs idées et leurs opinions personnelles sur les arguments qui leur seront présentés. Qu'ils veuillent se pénétrer de l'idée que leurs Rapports sont destinés à servir de base à une discussion des plus amples et des plus complètes.

5. Les Rapports devront parvenir au Secrétariat du Comité (à Milan, via San Paolo, 10) avant le 30 juin 1911.

6. En outre des Rapports officiels, le Congrès accueillera les communications et propositions de ses Membres ou des Associations électrotechniques, lorsque ces communications auront été soumises à l'approbation préalable du Comité d'organisation.

7. Le Comité d'organisation pourvoira en temps utile à l'impression des Rapports officiels qui devront être distribués aux séances du Congrès, aussi bien qu'à celle des communications et propositions, qu'il jugera à être présentées, pourvu que les uns ou les autres soient consignés à son Secrétariat avant le 30 juin 1911.

8. Les Rapports et communications pourront être indifféremment rédigés en italien, en français, en anglais ou en allemand. Tous ceux qui seront écrits en d'autres idiomes, devront être accompagnés, soit d'une traduction intégrale, soit d'un résumé étendu en langue française. Pour les publications en langue allemande, on devra employer exclusivement les caractères latins.

9. Les quatre idiomes sus-cités seront admis dans les discussions verbales.

10. Chaque Rapport ou communication paraîtra, dans le texte des Actes, dans la langue où il aura été présenté. Ceux qui seront imprimés en italien, en anglais ou en allemand seront suivis de leur traduction ou d'un résumé en langue française.

11. Le Comité se réserve de rédiger et de publier ultérieurement le Règlement

complet du Congrès, de déterminer le nombre des Sections qu'il faudra éventuellement établir et de tracer, d'accord avec la Commission exécutive, le programme des séances.

*Liste des thèmes officiels pour le Congrès international
des applications électriques (établie par la Commission d'organisation).*

1. Caractéristiques électriques et mécaniques des générateurs électriques modernes et considérations spéciales sur ceux à très grande vitesse.
2. État actuel de la technique de l'accumulateur électrique fixe ou servant à la traction.
3. Marche simultanée de plusieurs centrales qui alimentent un même groupe de réseaux.
4. De la tension à choisir et de la construction des tableaux et des sous-stations dans les grandes installations électriques sous le point de vue de l'économie des frais d'installation et sous celui de la continuité du service.
5. Des réseaux souterrains à haute tension reliés métalliquement aux lignes aériennes.
6. État actuel des études sur les surtensions et sur les systèmes de prévention et de protection qui s'y rapportent.
7. De la construction et de l'emploi des interrupteurs automatiques.
8. Le problème du refroidissement dans les transformateurs de dimensions moyennes.
9. Convertisseurs, redresseurs et moteurs-générateurs.
10. Le problème de la transformation de la fréquence.
11. Le moteur triphasé à vitesse variable, considéré spécialement dans son application aux laminoirs et aux machines à papier.
12. De l'influence technique et économique des lampes à filament métallique et des lampes à arc avec charbons métallisés, sur l'industrie de l'éclairage.
13. La traction monophasée et la traction triphasée sur lignes de grand trafic.
14. La traction monophasée et la traction à courant continu à haute tension sur les lignes interurbaines.
15. La ligne de prise de courant dans les chemins de fer électriques.
16. De l'acier obtenu directement du minerai par l'emploi des fours électriques.

17. De la stérilisation de l'eau par les procédés qui utilisent l'électricité.
 18. Le compteur électrique, eu égard à la nature et aux différents régimes de charge.
 19. Du timbrage des compteurs électriques.
 20. Méthodes rationnelles pour la mesure commerciale de l'énergie électrique.
 21. Le problème de l'augmentation du facteur de charge dans les centrales électriques.
 22. Les applications de l'électricité aux bateaux submersibles.
 23. Téléphonie ordinaire à grandes distances.
 24. La téléphonie sans fils.
 25. Les systèmes téléphoniques automatiques et semi-automatiques dans leurs rapports avec l'économie et le perfectionnement des communications dans les grandes villes.
 26. Le problème du secret dans les communications radiotélégraphiques.
 27. État actuel et développement futur du chauffage électrique.
 28. Étude comparative de la fiscalité directe et indirecte sur l'énergie électrique dans les différents pays.
 29. La législation sur la transmission électrique de l'énergie.
 30. De la distribution de l'énergie électrique pour les travaux agricoles.
 31. Divers systèmes de télégraphie multiple.
- 

LISTE DES OUVRAGES

OFFERTS A LA SOCIÉTÉ INTERNATIONALE DES ÉLECTRICIENS

(Suite.)

La Bibliothèque est ouverte aux Membres de la Société, tous les jours,
de 3 heures à 6 heures, excepté les dimanches et jours de fêtes,
12, rue de Staël.

France.

- Année (L') électrique, électrothérapique et radiographique. Revue annuelle des progrès électriques en 1910*, par le Dr FOVEAU DE COURMELLES. 11^e année. Paris, Ch. Béranger, 1911; 1 vol. in-18, broché (*Don de l'éditeur.*)
- Électricité (L') et ses applications*, par le Dr L. GRAETZ. Traduit sur la 15^e édition allemande par Georges Tardy, Préface par H. LÉAUTÉ. Paris, Masson et C^{ie}, 1911; 1 vol. gr. in-8, relié toile. (*Don de l'éditeur.*)
- Électrochimie*, par Henri VIGNERON. Paris, L. Geisler, 1911; 1 vol. in-8, broché (*Encyclopédie électrotechnique*, 44^e fascicule). (*Don de l'éditeur.*)
- Essais des machines à courants alternatifs*, par J. FERROUX. Paris, L. Geisler, 1911; 1 vol. in-8, broché (*Encyclopédie électrotechnique*, 48^e fascicule). (*Don de l'éditeur.*)
- Georges Berger et l'Exposition internationale d'Électricité de 1881*, par Gaston SCIAMMA. Paris, Gauthier-Villars, 1910; 1 brochure gr. in-8 (avec portrait). (*Don de l'auteur.*)
- Guide pratique de mesures et essais industriels. — T. III. Mesures électriques industrielles. Instruments et méthodes de mesure*; par J.-A. MONTPELLIER et M. ALIAMET. Paris, Dunot et Pinat, 1911; 1 vol. in-8, broché. (*Don des éditeurs.*)
- Induction et courants alternatifs*, par Eug. VIGNERON. Paris, L. Geisler, 1910; 1 vol. in-8, broché (*Encyclopédie électrotechnique*, 5^e fascicule). (*Don de l'éditeur.*)
- Leçons sur l'Électricité, professées à l'Institut électrotechnique Montefiore*, par ERIC GÉRARD. 8^e édition. Paris, Gauthier-Villars, 1910; 2 vol. gr. in-8, brochés. (*Don de l'éditeur.*)

Monographie sur l'état actuel de l'industrie du froid en France, publiée à l'occasion du II^e Congrès international du Froid (Vienne, 6-11 octobre 1910), par le Comité français de participation, sous la direction de M. J. DE LOVERDO. Paris, siège social de l'Association française du Froid, 1911; 1 vol. gr. in-4, broché. (*Don de l'Association française du Froid.*)

Technologie électrique, par LE SOUHAITIER. Préface de C. LEBOS, Paris, Ch. Delagrave, 1911; 1 vol. in-8 oblong, cartonné (*Bibliothèque des Écoles pratiques de commerce et d'industrie*). (*Don de l'éditeur.*)

Télégraphie (La) sans fil. La téléphonie sans fil. Applications diverses, par G.-E. PETIT et LÉON BOUTHILLON. Paris, Ch. Delagrave, 1910; 1 vol. in-8, relié toile. (*Don de M. G.-E. Petit.*)

Traité de Radioactivité, par M^{me} P. CURIE. Paris, Gauthier-Villars, 1910; 2 vol. in-8 brochés. (*Don de l'éditeur.*)

Turbines à vapeur, par le Commandant F. CORDIER. Paris, Oct. Doin et fils, 1911; 1 vol. in-18 Jésus, cartonné toile (*Encyclopédie scientifique*). (*Don de l'éditeur.*)



BULLETIN

DE LA

SOCIÉTÉ INTERNATIONALE

DES

ÉLECTRICIENS.

SOMMAIRE.

Compte rendu de la réunion mensuelle de mars 1911 : Admission de membres titulaires, p. 122. — Liste des candidats pour les élections au Comité d'Administration, p. 123. — Sur un fréquence-mètre enregistreur et sur le principe d'un relais ou servomoteur sans réaction (M. H. Abraham), p. 125. — Notes de voyage sur quelques laboratoires américains (M. F. Laporte), p. 137.

CORRESPONDANCE, p. 166.

BIBLIOGRAPHIE, p. 169.

OUVRAGES OFFERTS, p. 172.

COMPTE RENDU

DE LA

RÉUNION ORDINAIRE MENSUELLE

du mercredi 1^{er} mars 1911 ⁽¹⁾.

PRÉSIDENCE DE M. A. BOCHET.

La séance est ouverte à 8 h 40 m du soir.

Le procès-verbal de la dernière réunion mensuelle est adopté.

Il est donné connaissance des Ouvrages offerts à la Bibliothèque de la Société (voir p. 172) et des demandes d'admission suivantes :

⁽¹⁾ La Société n'est pas solidaire des opinions émises par ses Membres dans les discussions ni responsable des Notes ou Mémoires publiés dans le *Bulletin*.

MM.

- Belot** (Jacques), Attaché aux Services électriques des *Chemins de fer de l'État*, 137, rue du Ranelagh, à Paris. — Présenté par MM. Janet et Chaumat.
- Bianu** (Basile), Laboratoire Curie, 3, rue de Vaugirard, à Paris. — Présenté par MM. Janet et Chaumat.
- Chopin** (Louis), Sapeur télégraphiste, compagnie 24/5, 5^e Génie, au Mont-Valérien, à Suresnes (Seine). — Présenté par MM. Janet et Chaumat.
- Durand** (Henry-Auguste), Élève à l'*École d'Électricité et de Mécanique industrielle*, 3, rue Auguste-Bartholdi, à Paris. — Présenté par MM. E. Guillon et Sogno-Lafongt.
- Flato-Szyff** (Joseph), Ingénieur en chef dans le *Bureau des Installations*, 8, rue Ogródowa, à Varsovie (Russie). — Présenté par MM. Janet et Chaumat.
- Garbarini** (André), Sapeur télégraphiste à la 5^e compagnie du 5^e Génie, au Mont-Valérien, à Suresnes (Seine). — Présenté par MM. Janet et Chaumat.
- Géraud** (Benjamin), Service électrique des Travaux neufs de la *Compagnie du Chemin de fer Métropolitain de Paris*, 2, rue Malber, à Paris. — Présenté par MM. Janet et Chaumat.
- Jourdana** (Joseph), Ingénieur diplômé de l'E.-S.-E., Contrôleur de la fabrication des billets à la Banque de France, 6, rue des Écoles, à Saint-Cloud (Seine-et-Oise). — Présenté par MM. Janet et Chaumat.
- Lambrey** (Jean-Octave-Henri), Sapeur électricien au Régiment des Sapeurs-Pompiers de la Ville de Paris; caserne de la rue de Poissy, à Paris. — Présenté par MM. Janet et Chaumat.
- Meyer** (Paul), Ingénieur à la *Compagnie lorraine d'Électricité*, 76, rue du Faubourg-Saint-Jean, à Nancy (Meurthe-et-Moselle). — Présenté par MM. A. Joubert et Mauduit.
- Perdrizet** (Paul-Émile-Auguste-André), Dessinateur à la *Maison Harlé et C^{ie}*, 113, avenue de la Bourdonnais, à Paris. — Présenté par MM. Janet et Chaumat.
- Picard** (Aristide), Élève à l'*École d'Électricité et de Mécanique industrielle*, 50, rue Violet à Paris. — Présenté par MM. E. Guillon et Sogno-Lafongt.
- Roche** (Fernand-Valentin), Soldat au 79^e d'Infanterie, 9^e compagnie, à Nancy (Meurthe-et-Moselle). — Présenté par MM. Janet et Chaumat.
- Salles** (Robert), Ingénieur à la *Compagnie française Thomson-Houston*, 1, rue Rabelais, à Paris. — Présenté par MM. Janet et Chaumat.
- Vaeza-Ocampo** (Edouard), Auditeur libre à l'*École supérieure d'Électricité*, 27, rue Fourcroy, à Paris. — Présenté par MM. Janet et Chaumat.
- Villiers** (Charles), Ingénieur diplômé de l'*École supérieure d'Électricité*, Titulaire de la bourse Ilugues, 31, rue d'Alésia, à Paris. — Présenté par MM. Janet et Chaumat.

Ces candidats sont élus membres titulaires de la Société internationale des Électriciens.

Conformément à l'article 14 du Règlement intérieur, M. le Président fait connaître les noms des candidats que le Comité propose au choix de la Société pour les élections en renouvellement partiel du Comité d'administration et de la Commission des Comptes qui auront lieu dans l'Assemblée générale d'avril prochain; savoir :

PRÉSIDENT (*Exercice 1912-1913*).

MM.

Grosselin (M.), Ingénieur civil des Mines.

VICE-PRÉSIDENTS.

Ferrié (G.), Chef de bataillon du Génie.

Marchena (de), Ingénieur en chef de la *Compagnie française Thomson-Houston*.

SECRÉTAIRE GÉNÉRAL.

Valbreuze (R. de), Administrateur-Délégué des *Anciens Établissements Deberghe et Lafaye*.

SECRÉTAIRES.

Bureau (H.), Chef de Travaux au *Laboratoire central d'Électricité*.

Gorce (P. de la), Chef de Travaux au *Laboratoire central d'Électricité*.

MEMBRES.

Barbillon (L.), Directeur de l'Institut électrotechnique de l'Université de Grenoble.

Boris (R.), Ingénieur de la Marine.

Cellerier (J.), Directeur du Laboratoire d'essais au *Conservatoire national des Arts et Métiers*.

Cordier (Commandant), Chef du Service de l'atelier de précision à la *Section technique d'Artillerie*.

Cordier (G.), Administrateur-Délégué de la *Société Énergie électrique du Littoral Méditerranéen*.

David (Ch.), Ingénieur-Conseil.

Dehenne (G.), Ingénieur en chef aux *Établissements Harlé et C^{ie}*.

Devaux-Charbonnel (X.), Ingénieur des *Télégraphes*.

Gillaume (Ch.-Ed.), Directeur adjoint du *Bureau international des Poids et Mesures*.

Joly (L.), Ingénieur aux *Ateliers Carpentier*.

Labour (E.), Ingénieur.

Liouville (L.), Ingénieur des Arts et Manufactures.

Lorin (Ch.), Ingénieur des Arts et Manufactures.

Mazen (N.), Ingénieur des Services électriques des *Chemins de fer de l'Ouest-État*.

Rateau (A.), Professeur à l'*École supérieure des Mines*.

Sartiaux (Eug.), Ingénieur en chef des *Services électriques du Chemin de fer du Nord*.

Villard (P.), Membre de l'Institut.

COMMISSION DES COMPTES.

Belugou (V.), Ingénieur en chef des *Postes et Télégraphes*.

Brylinski (E.), Directeur de la *Société « Le Triphasé »*.

Courtois (G.), Directeur de l'*Usine des constructions électriques de la Société industrielle des Téléphones*.

M. le PRÉSIDENT confirme la Circulaire envoyée aux membres de la Société pour leur faire part d'une excursion dans le sud de la France organisée par le Bureau et ayant pour but la visite des plus

intéressantes usines hydroélectriques ou installations de transport d'énergie : il prie les sociétaires qui désireraient se joindre au groupe des excursionnistes de faire parvenir leur adhésion avant le 5 courant, le départ étant fixé au 19 mars.

L'ordre du jour appelle les Communications techniques.

**SUR UN FRÉQUENCÉMÈTRE ENREGISTREUR ET SUR LE PRINCIPE D'UN RELAIS
OU SERVOMOTEUR SANS RÉACTION.**

M. HENRI ABRAHAM. — « Messieurs, les appareils que je désire présenter aujourd'hui à la Société ont tous pour principe l'emploi d'un cadre mobile pouvant tourner dans le champ magnétique alternatif d'un électro-aimant à fer feuilleté. Je vous demanderai donc la permission de rappeler d'abord quelques propriétés de ce genre d'appareils. Nous verrons ensuite quel intérêt il y a à supprimer tout ressort élastique dans ces instruments, de manière qu'ils soient uniquement formés par un cadre entièrement libre, dont les positions d'équilibre sont fixées par l'action des courants induits.

» 1. LES APPAREILS A CADRE MOBILE ET A ÉLECTRO-AIMANTS POUR COURANTS ALTERNATIFS. — Tout le monde connaît l'électrodynamomètre classique et l'on sait quels services il peut rendre. On sait aussi que l'électrodynamomètre peut être rendu extrêmement sensible si l'on consent à créer le champ magnétique où tourne le cadre mobile avec un *électro-aimant à noyau de fer*. Mais on a craint souvent que, pour les courants alternatifs, la présence du fer dans l'électro ne puisse être la cause de perturbations complexes et peut-être très importantes.

» Pourtant, si l'entrefer de l'électro est suffisant, le champ magnétique dans cet entrefer devrait être à chaque instant à très peu près proportionnel à l'intensité instantanée du courant alternatif d'excitation et le fer ne devrait intervenir que pour augmenter la sensibilité.

» Pour l'un des instruments que vous avez sous les yeux, je me suis assuré qu'il en est bien ainsi en relevant à l'*hystérésigraphe* ⁽¹⁾ la courbe dont les abscisses sont proportionnelles aux valeurs du courant d'excitation et les ordonnées proportionnelles aux

(¹) HENRI ABRAHAM, *Hystérésigraphe de projection* (Bulletin, t. IX, 1909, p. 461)..

valeurs du champ magnétique dans l'entrefer; cette courbe, dont je projette maintenant une photographie, se confond pratiquement avec une simple ligne droite.

» Il en résulte d'abord que l'électro-aimant possède un coefficient de self-induction bien défini, ce qui a une certaine importance pour justifier plusieurs dispositifs expérimentaux qui ne sont bien corrects qu'en raison de cette propriété.

» Mais, ce qui est plus important encore, c'est que la théorie des électrodynamomètres se trouve alors applicable à ces appareils, qui sont de bons électrodynamomètres et, surtout, des électrodynamomètres extrêmement sensibles⁽¹⁾, susceptibles de bien des applications.

» En suspendant le cadre mobile comme celui d'un galvanomètre d'Arsonval, j'ai fait réaliser, il y a quelques années, le gal-

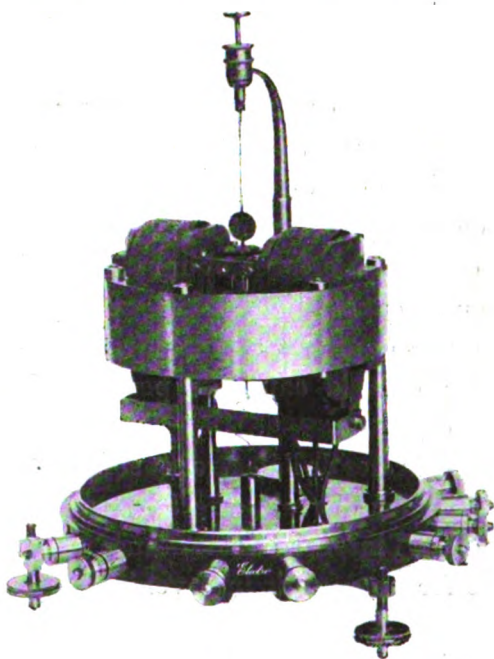


Fig. 1. — Galvanomètre à cadre mobile pour courant alternatifs.

vanomètre pour courants alternatifs que voici (fig. 1), qui est tout

(¹) H. ABRAHAM, *Galvanomètre pour courants alternatifs* (*Journal de Physique*, t. V, 1906, page 576).

aussi sensible et tout aussi utile qu'un galvanomètre à cadre mobile pour courants continus (¹).

» Pour faire, par exemple, une mesure de capacité, je mets quelques volts alternatifs sur les armatures d'un fragment de câble sous plomb d'un mètre de long. La déviation du galvanomètre est considérable, et vous voyez maintenant, par comparaison avec un condensateur étalon, que la capacité effective du fragment de câble est d'un millième de microfarad.

» Si au lieu de nous servir d'un galvanomètre à cadre suspendu, nous mesurons ces courants de capacité avec un galvanomètre à pivots, nous aurons un instrument que nous pourrions appeler *capacimètre à lecture directe*.

» Je signale à part cet instrument un peu étranger à l'objet de ma communication, parce que je dois à M. HÉLITAS cette observation très intéressante que ce dispositif constitue en réalité un

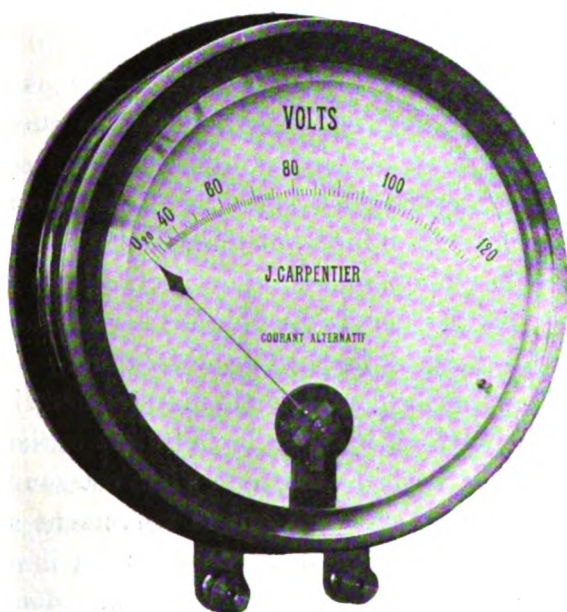


Fig. 2. — Voltmètre.

voltmètre (fig. 2) dont les indications sont indépendantes de la fréquence. Si, en effet, la fréquence augmente, le courant de capacité

(¹) HENRI ABRAHAM et DEVAUX-CHARBONNEL, *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. 144, 1907, p. 1209.

augmente proportionnellement, tandis que le champ magnétique de l'électro, qui fonctionne ici comme self, varie en sens inverse et dans la même proportion. Ce voltmètre ne demande qu'une faible capacité : aussi sa consommation est-elle très réduite, de l'ordre du centième d'ampère seulement.

» Ce n'est pas seulement pour des mesures de capacité qu'on peut faire appel utilement à ces appareils galvanométriques à électros : toutes les mesures en courants alternatifs, pour lesquelles on a besoin de sensibilité, se font avec eux dans de très bonnes conditions. Vous voyez en ce moment que notre galvanomètre est relié à une bobine exploratrice et nous constatons que la salle de nos séances tout entière est remplie par le champ magnétique alternatif de ce rhéostat où ne passent que quelques ampères. Rien n'est plus facile que de transformer ce montage galvanométrique en un dispositif à lecture directe qui sera un *fluxmètre pour courants alternatifs*.

» 2. APPAREILS SANS RESSORT DE RAPPEL. — Dans le fréquence-mètre à lecture directe et dans le fréquencemètre enregistreur que vous avez sous les yeux, le cadre mobile, monté sur pivots, est dépourvu de tout ressort de rappel. Le courant est amené par des rubans d'argent très minces, et le cadre est entièrement libre de tourner dans le champ magnétique alternatif de l'électro.

Ce sont les forces électromotrices induites par le champ alternatif dans le cadre qui en fixent la position d'équilibre.

» Il est aisé de se rendre compte de la manière dont interviennent ces forces électromotrices. Puisque le cadre est entièrement libre, il ne peut garder une position fixe que s'il n'est soumis à aucune force, c'est-à-dire si les courants qui le traversent sont en quadrature avec le champ magnétique dans lequel il peut tourner.

» Supposons que l'appareil se trouve d'abord dans la position où le cadre n'est traversé par aucun flux (nous verrons plus loin que c'est sa position normale d'équilibre) et envoyons-y un courant qui soit capable de le faire dévier, c'est-à-dire qui ne soit pas en quadrature avec le champ : l'appareil commence à tourner.

» Mais dès que le cadre tourne, la force électromotrice d'induction due au champ alternatif de l'électro se fait sentir, créant

un courant induit qui se superpose au courant moteur, se compose avec lui, modifie son intensité et qui, à cause de la self du circuit, rapproche sa phase de la quadrature. Le cadre ne continue donc à être entraîné que jusqu'à ce que le courant soit ramené à être exactement en quadrature avec le champ : l'appareil a alors atteint sa nouvelle position d'équilibre.

» On voit donc que, lorsqu'on envoie dans l'appareil un courant qui tend à faire tourner le cadre, le mouvement se produit, mais ce mouvement est limité par la réaction interne due aux courants induits, absolument comme il le serait par l'action d'un ressort qui tendrait à maintenir le cadre au zéro.

» Je ferai encore une remarque utile :

» *La position d'équilibre du cadre mobile est indépendante de la tension du réseau qui alimente les circuits.*

» Cette proposition résulte de ce que les variations de tension du réseau sont sans action sur les différences de phase, et que ce sont seulement ces différences de phase qui fixent la position d'équilibre.

» En raison de cette dernière remarque, les appareils à un seul cadre mobile sans ressort de rappel peuvent donc, pour plusieurs genres de mesures, rendre les mêmes services que les appareils à deux cadres, comme est le si intéressant *logomètre* dont M. Joly nous entretenait l'autre jour.

» 3. COUPLES STABILISANTS ET INSTABILISANTS. — Il est intéressant de noter que, dans ces appareils galvanométriques à un seul cadre sans ressort de rappel, l'équilibre du cadre mobile est généralement très stable : si on l'écarte de cette position d'équilibre, il y est ramené vivement par un couple énergétique. Ce couple de rappel, d'origine électromagnétique, est dû à ce que le déplacement supplémentaire qu'on vient de lui imprimer provoque dans le cadre la production de nouveaux courants induits, et c'est l'action du champ magnétique de l'électro sur ces courants qui ramène le cadre au zéro, comme le ferait un ressort élastique.

» L'intensité du couple de rappel, du *ressort électromagnétique* ainsi créé, dépend essentiellement du retard de phase des courants induits dans le cadre mobile par rapport à la force électromotrice d'induction qui leur donne naissance. Le couple de rappel serait

nul si le courant était en phase avec la force électromotrice, c'est-à-dire si le circuit du cadre ne possédait aucune self-induction, ou bien si l'effet de la self-induction avait été compensé par un effet de capacité. Le couple serait négatif et l'équilibre deviendrait instable si l'effet de capacité devenait prépondérant. Le couple de rappel est au contraire positif et l'équilibre est stable si le circuit du cadre possède de la self-induction, la self-induction la plus favorable à la stabilité étant celle qui cause un retard de un huitième de période ($\omega L = R$).

» Le calcul et l'expérience s'accordent pour constater que les couples de rappel qu'on peut obtenir ainsi sont suffisamment énergiques pour donner au cadre mobile une période d'oscillations propres d'une fraction de seconde, avec amortissement ⁽¹⁾, ce qui lui permet de suivre très convenablement la plupart des phénomènes usuels des courants alternatifs, et d'enregistrer leurs variations.

» 4. APPLICATION A UN FRÉQUENCEMÈTRE ENREGISTREUR ⁽²⁾. — La figure 3 donne le schéma de la combinaison de circuits adoptée dans le fréquencemètre enregistreur qui fonctionne ici ce soir.

» L'électro-aimant (1) (fig. 3) est actionné par le réseau, avec interposition d'une petite résistance (2). Le réseau actionne en même temps un circuit auxiliaire formé d'une forte résistance (3), suivie d'une petite bobine d'induction mutuelle (4, 5) qui est sans fer, ou au moins à fer non saturé avec circuit magnétique ouvert. En raison de la forte self-induction de l'électro, le courant du premier circuit est en quadrature avec la f. e. m. du

⁽¹⁾ Je laisserai de côté la question de l'amortissement. Certaines combinaisons de circuits donnent un *amortissement négatif*, et l'équilibre devient instable. Mais il s'agit là d'une instabilité toute particulière : les mouvements oscillatoires lents que le cadre prend autour de sa position d'équilibre ne disparaissent pas d'eux-mêmes, ils vont au contraire en s'accroissant de plus en plus jusqu'à être désordonnés et à forcer à interrompre l'expérience.

⁽²⁾ On réalise aussi sans peine un *ohmmètre enregistreur* dont les indications sont indépendantes de la tension et de la fréquence du réseau. Un tel appareil peut rendre des services comme thermomètre enregistrant à distances des variations de température avec une grande sensibilité.

réseau, tandis que le courant du second circuit est en phase avec cette f. e. m.

» Le cadre mobile (6) est mis en série avec la résistance (2) du premier circuit et le secondaire (inversé) de la bobine d'induction

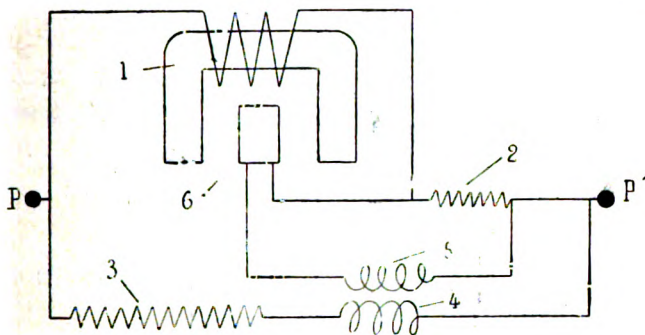


Fig. 3. — Circuits du fréquencesmètre enregistreur : PP' poles du réseau ; 1, électro ; 2 et 3, résistances ; 4, 5, induction mutuelle ; 6, cadre mobile.

mutuelle (4, 5) du second circuit. Les forces électromotrices (2) et (5) qui sont toutes deux sensiblement en phase avec le champ magnétique de l'électro, et qui isolément tendraient à provoquer des rotations de sens inverse du cadre mobile, vont ici se retrancher et le réglage est fait de telle sorte que le cadre se maintienne au zéro pour la valeur normale de la fréquence.

» Si alors la période du réseau varie, les f. e. m. qu'on opposait cessent de se compenser, car l'une augmente tandis que l'autre diminue ; l'équilibre est donc rompu et le cadre tourne à droite ou à gauche selon le sens des variations de fréquence, jusqu'à ce que la force électromotrice d'induction résultant du changement de position du cadre mobile ramène le courant total à être en quadrature avec le champ. Comme je l'ai déjà fait remarquer, la position d'équilibre que l'appareil prend ainsi pour chaque valeur de la fréquence est indépendante des variations de tension du réseau.

» L'instrument, tel qu'il est réalisé ici, consomme environ 0,5 ampère. Les efforts qui y sont exercés sont largement suffisants pour qu'il inscrive directement les variations de fréquence par un tracé à la plume. Il est adapté à un enregistreur à ordonnées rectilignes du modèle actuel des Ateliers Carpentier (fig. 4).

L'échelle de ce modèle s'étend aux fréquences comprises entre 40 et 50 périodes par seconde. On a vérifié que ses indications sont sensiblement indépendantes des variations de forme



Fig. 4. — Fréquencemètre enregistreur.

de la courbe du courant, tant que ces variations sont raisonnables; mais il est bien évident que ses indications seraient faussées si le courant de fréquence fondamentale disparaissait presque complètement et s'il n'en restait guère que les harmoniques devenus prépondérants.

» Je donne ci-contre (*fig. 5*) la reproduction, à l'échelle $\frac{1}{3}$ environ, d'une feuille de journée du fréquencemètre enregistreur branché sur un réseau urbain dont la fréquence nominale est de 42 périodes par seconde. On y relève des particularités intéressantes : après un certain calme nocturne, la charge progressive au réveil se traduisant par l'abaissement progressif de la fréquence suivi d'un brusque réglage; les grandes variations accidentelles qui se pro-

duisent constamment pendant la journée; les singularités exceptionnelles aux moments des changements de machines génératrices,

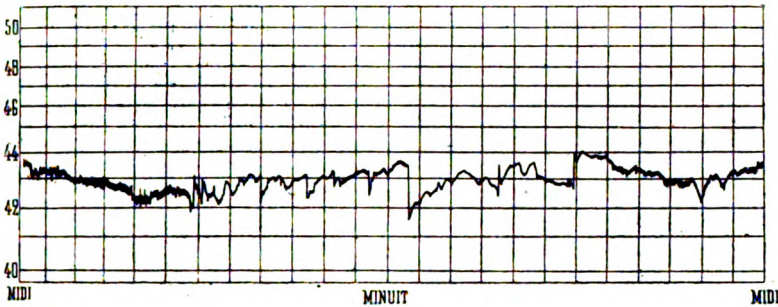


Fig. 5. — Feuille de journée du fréquencesmètre enregistreur sur un réseau à 42 périodes par seconde (réduction $\frac{1}{3}$); échelle des fréquences : de 40 à 50 périodes par seconde.

des gros allumages et des extinctions de l'éclairage; et l'épaississement du trait pendant certaines heures du jour, lorsque l'alternateur est conduit sans doute par une seule machine dont tous les coups de piston produisent des variations périodiques de la fréquence.

» *Fréquencesmètre indicateur à grande sensibilité et à très faible consommation.* — Le dispositif, représenté schématiquement par la figure 6, comporte maintenant un condensateur. Le réseau,

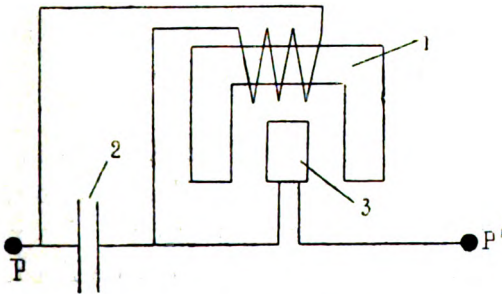


Fig. 6. — Circuit d'un fréquencesmètre indicateur : PP' pôles du réseau; 1, électro; 2, condensateur; 3, cadre mobile.

dont les pôles sont PP', alimente à la fois l'électro (1) et un condensateur (2), et c'est le courant total, somme de ces deux courants d'alimentation, qui traverse le cadre mobile (3). Le condensateur (2) est réglé en résonance avec la self-induction de l'électro (1); le

courant d'ailleurs très faible qui passe dans le cadre se trouve alors en quadrature avec le champ dans l'électro, et l'instrument reste au zéro tant que la fréquence reste invariable. Mais dès que

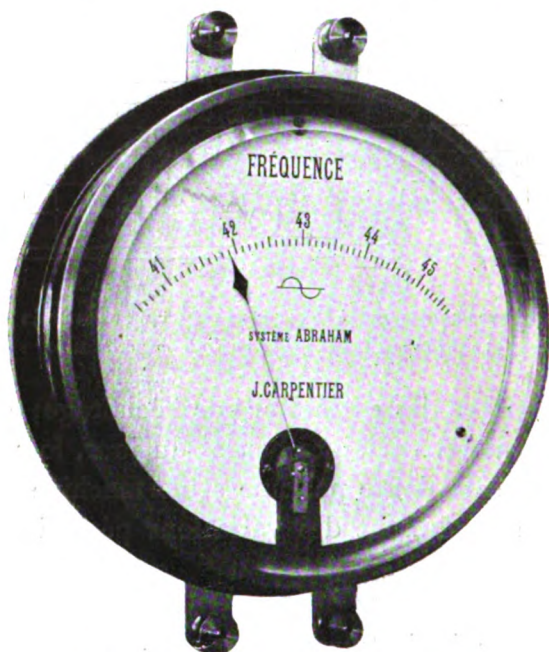


Fig. 7. — Fréquencemètre à lecture directe.

la fréquence change, c'est le courant de capacité ou bien le courant de self-induction qui l'emporte, la phase du courant total avance ou retarde, et le cadre tourne dans un sens ou dans l'autre.

» Les indications de l'appareil sont encore indépendantes de la tension.

» La sensibilité de ce fréquencemètre (fig. 7) peut être rendue très grande et donner par exemple toute l'échelle pour une variation de fréquence de 2 pour 100 en plus ou en moins par rapport à la fréquence normale. Sa consommation est de l'ordre de $\frac{1}{100}$ d'ampère.

» Ces différents appareils ont été réalisés dans les ateliers de M. Carpentier, à qui je tiens à exprimer tous mes remerciements pour son aimable collaboration.

» 5. RELAIS SERVOMOTEURS SANS RÉACTION. — En terminant cette communication, je voudrais encore signaler une générali-

sation des considérations précédentes sur les forces directrices qui s'exercent sur un cadre mobile placé dans un champ magnétique alternatif.

» Supposons que nous ayons relié l'un à l'autre deux appareils galvanométriques à cadre mobile et que nous nous proposons de transmettre au second les mouvements du premier. Si les deux cadres sont reliés borne à borne et si les deux électros sont en série, il est clair que, dès qu'on tournera le premier cadre, le second cadre supposé entièrement libre tournera proportionnellement jusqu'à ce que le flux total dans le circuit des cadres soit nul, comme le font les rotors couplés d'un transmetteur d'ordres à champ tournant (Routin).

» Mais nous pouvons être plus exigeants et nous pouvons nous demander s'il est possible de satisfaire à la fois aux quatre conditions suivantes :

» 1^o Les courants induits dus à la rotation du cadre transmetteur doivent être sans aucune action sur les mouvements de ce cadre transmetteur;

» 2^o Le cadre récepteur doit être violemment entraîné par les courants que cause la rotation du transmetteur;

» 3^o La nouvelle position d'équilibre du cadre récepteur doit être très stable, c'est-à-dire que le cadre récepteur doit revenir vivement de lui-même vers cette position d'équilibre, si on l'en a écarté un instant;

» 4^o Mais ni les déplacements, ni l'arrêt du récepteur ne doivent provoquer aucun couple de réaction sur le transmetteur, qui doit continuer à rester entièrement libre, bien qu'il commande énergiquement le récepteur.

» Il est remarquable que *ces conditions ne sont pas incompatibles*. Les équations du problème sont très simples : on y satisfait sans difficulté de bien des manières par le jeu des différences de phases, et l'expérience confirme les prévisions théoriques.

» Nous sommes donc, en principe du moins, en possession d'un relais ou plutôt d'un servomoteur qui jouit des propriétés suivantes :

» Dépourvu de tout frottement, le transmetteur démarre sous l'action du moindre couple, bien que le récepteur soit en charge.

Dès que le cadre transmetteur tourne, il fonctionne comme secondaire d'un transformateur à couplage variable et puise dans le champ de son électro l'énergie nécessaire pour faire mouvoir le récepteur. Les mouvements transmis au récepteur sont proportionnés à ceux du transmetteur qui les commande énergiquement. Mais ni le fonctionnement, ni l'arrêt du récepteur n'exercent aucune réaction sur le transmetteur.

» Il me semble que des dispositifs de ce genre seront susceptibles de fournir, pour plusieurs problèmes intéressants de la pratique industrielle, une solution à laquelle j'espère pouvoir apporter quelque contribution utile. »

M. le PRÉSIDENT. — « M. Abraham nous a depuis longtemps accoutumés à la présentation magistrale de ses intéressants travaux; nous le remercions vivement de maintenir si bien cette heureuse tradition. »

NOTES DE VOYAGE SUR QUELQUES LABORATOIRES AMÉRICAINS.

M. F. LAPORTE. — « La Commission des Unités électriques, réunie à Londres en 1908, fixa les questions de principe, arrêta les grandes lignes des spécifications et indiqua 1,084 comme valeur provisoire de la force électromotrice de la pile étalon Weston à 20°C. La Commission, pour continuer le travail qui restait à faire, nomma un Comité scientifique permanent de 15 membres.

» Dans le courant de l'été 1909, M. Stratton, directeur du Bureau des Étalons, Laboratoire national des États-Unis, proposa au Comité scientifique de réunir à Washington quelques physiciens étrangers pour qu'ils puissent étudier, par des expériences faites en commun, les conditions expérimentales à recommander pour le voltamètre à argent et la construction des éléments étalons et surtout pour qu'ils fixent, avec une plus grande précision, la valeur de la force électromotrice de la pile Weston en fonction de l'ohm et de l'ampère.

» Par suite de divers retards, c'est au mois de mars 1910 que j'eus l'honneur d'être désigné pour aller à Washington avec M. le professeur Jæger, conseiller intime, attaché à l'Institut impérial physico-technique, et M. Smith, physicien au Laboratoire national de Physique, pour travailler avec M. le professeur Rosa, physicien, et le Dr Wolff, physicien associé au Bureau des Étalons.

» J'étais aussitôt prévenu que les frais de voyage et de séjour à Washington étaient couverts par les souscriptions de quatre grandes Sociétés techniques américaines désireuses de montrer à l'Europe que les industriels du nouveau monde s'intéressaient aux recherches scientifiques même quand elles étaient purement abstraites et sans application possible.

» De son côté, le Comité de notre Société m'ouvrait des crédits que de généreux souscripteurs avaient vite faits de réunir et il me recommandait de profiter de ce voyage transatlantique pour voir et pour apprendre le plus possible.

» Permettez-moi d'exprimer devant vous toute ma reconnais-

sance à M. Janet qui a bien voulu proposer ma désignation, au Comité qui a tout fait pour faciliter mon voyage et le rendre intéressant et profitable, et tout particulièrement à M. Bochet qui a bien voulu solliciter pour moi une mission officielle du Ministère des Travaux publics.

» Après des préparatifs hâtifs et l'emballage laborieux de mes appareils, je m'embarquai le 19 mars.

» Dès mon arrivée dans les eaux américaines, je pus juger de la cordialité de l'accueil qui m'attendait. M. Sharp, directeur des Laboratoires d'essais électriques, que j'avais connu à Paris, prévenu par le Bureau, était venu à ma rencontre presque en pleine mer avec le bateau de la douane pour me souhaiter la bienvenue et pour faciliter mes premiers pas en Amérique.

» J'ai été partout reçu avec cordialité et prévenance; mais parmi les nombreuses personnes qui m'ont si aimablement accueilli, permettez moi de citer tout particulièrement : M. Stratton, directeur du Bureau; MM. Rosa et Wolff, et aussi M. Burgess qui a bien voulu me servir si souvent d'interprète. A New-York, M. Sharp, M. Weaver; l'aimable directeur de l'*Electrical World*, le Dr Weston; M. le professeur Ganz. A Schenectady, le Dr Witney; à Cleveland, M. Hyde et M. Doane. Dans les ateliers de la Westinghouse, à Pittsburg, M. Scott et M. Delaval. J'ai vu à l'Université Mac Gill, à Montréal, MM. Herdt et Barnes, et enfin à Boston M. Kennelly, le savant et aimable professeur de Harvard University, et MM. Jackson et Pender, professeurs à l'Institut technologique du Massachusetts.

» Je fus rejoint à New-York par M. Jæger, puis par M. Smith, et nous étions tous les trois au commencement d'avril à Washington. Nos travaux durèrent 2 mois.

» De nombreuses comparaisons des résistances des piles étalons et des voltamètres à argent furent faites pendant ce temps, et vous avez vu récemment le communiqué de M. Janet qui en est le premier résultat. La valeur de la pile étalon Weston à 20° C. est égale à 1,0183 au lieu de 1,0184, comme l'avait indiqué la Conférence de Londres. Cette modification, que tous les Laboratoires attendaient, a pu être prise tout de suite. Le reste de nos travaux n'a pas été encore rédigé d'une façon définitive; je suis donc tenu au silence et je ne puis vous en parler aujourd'hui.

» Ce que je puis dire, c'est que le travail fut assidu; en dehors des dimanches, il ne fut suspendu que pendant une seule journée complète, pour aller à New-York assister au dîner donné aimablement en notre honneur par le Comité électrotechnique américain.

» Une autre demi-journée fut prise sur le travail pour la visite du Palais des Congrès à Washington et la présentation à M. Joe Comman, speaker de la Chambre des Représentants, et à M. Nagel, Ministre du Commerce et du Travail. Enfin un autre matin, nous arrivâmes au Bureau une heure plus tard que d'ordinaire; nous avions été retardés par notre audience chez M. Taft, président de la République.

I. — LABORATOIRE NATIONAL.

Bureau of Standards. — Washington.

» Le Bureau des Étalons est un laboratoire national. Le directeur, M. Stratton, relève directement du Ministre du Commerce et du Travail, actuellement M. Nagel.

» Tous les ans le Ministre charge un Conseil d'inspecteurs, choisis parmi les notabilités les plus élevées de la Science américaine, de lui faire un rapport sur le fonctionnement du Bureau :

MM. Remsen, président de J. Hopkins University;
Woodwood, président de la Fondation Carnegie
of Washington;
Pritchett, président de la Fondation Carnegie
pour les professeurs;
Hower, professeur à Columbia University;
Nichols, professeur à Cornell University.

» L'inspection dure plusieurs jours; elle est fort minutieuse et le rapport indique les appréciations sur l'année, et des propositions pour les modifications à apporter aux installations ou à l'organisation.

» C'est un acte du Congrès, daté du 3 mars 1901, qui a fondé le Bureau des Étalons. C'est en 1904 qu'il a pu commencer à s'installer dans les bâtiments actuels.

» Cette institution a pour but la conservation des étalons et

la comparaison avec les étalons adoptés ou reconnus par le Gouvernement, ceux qui sont employés aux recherches ou aux mesures scientifiques, techniques, industrielles ou commerciales. La compétence du Bureau s'étend à toute question de mesure. Le Gouvernement, les États, les Municipalités, les institutions scientifiques ou sociétés commerciales, enfin les particuliers peuvent lui demander des essais moyennant une redevance. Les essais pour le Gouvernement ou pour les États sont gratuits.

» Les divisions qui ont été formées et les physiciens auxquels elles ont été confiées sont les suivantes :

- I. Électricité, M. Rosa.
- II. Poids et mesures (poids, longueur, capacité), M. Fisher;
- III. Chaleur (thermométrie, calorimétrie), M. Waidner;
- IV. Optique, M. Stratton;
- V. Chimie, M. Hildebrand;
- VI. Essais mécaniques et industriels.

» L'Électricité qui nous intéresse davantage comprend les six sections suivantes :

Unités absolues, M. Dorsey;
Inductance et capacité, M. Grover;
Résistance et force électromotrice, M. Wolff;
Appareils de mesure à courant continu et alternatif, MM. Brooks et Agnew;
Courant alternatif et magnétisme, MM. Lloyd et Burrows;
Photométrie, M. Middlehauf.

DESCRIPTION SOMMAIRE.

» Le Bureau est situé au nord-ouest de Washington. Il a été bâti sur le sommet d'une colline boisée et se trouve à 300 m environ d'une route parcourue par un tramway électrique qui est le prolongement d'une avenue de la ville.

» Il y a actuellement quatre bâtiments disposés de trois côtés d'une esplanade rectangulaire. Un cinquième bâtiment est projeté le long du quatrième côté.

» Dans l'un des bâtiments se trouve les installations de force

motrice, les machines et l'atelier, mais celui-là comme les autres abrite aussi des laboratoires.

» Des galeries souterraines servent de passage aux nombreuses canalisations qui desservent les bâtiments. Dans chaque salle, en effet, en dehors des canalisations électriques d'éclairage et d'essais, en dehors des canalisations de ventilation et de chauffage, un faisceau de cinq tuyaux suit au moins une des parois de la pièce; ces tubes sont affectés à l'eau froide, à l'eau chaude, au gaz, à l'air comprimé et à l'air raréfié. Des branchements sont prêts pour pouvoir établir très rapidement et en n'importe quel point une prise sur une quelconque de ces canalisations.

» D'une façon générale, les murs sont épais, les cloisons ont une double paroi, les planchers très rigides et les fenêtres sur l'extérieur, à guillotine comme l'usage est général en Amérique, sont doublées, de manière à isoler plus complètement le laboratoire de l'extérieur.

» *Bâtiment principal.* — Chaque étage comporte huit laboratoires et quelques petites pièces servant de cabinets de travail aux chefs de service.

» C'était au rez-de-chaussée qu'on avait affecté deux de ces laboratoires aux délégués étrangers; l'un nous servait de salle de réunion, l'autre de cabinet de travail commun.

» *Les mesures de résistances* se font avec des appareils entièrement placés dans des bains de pétrole. Un thermostat établit ou rompt par un relais un circuit de chauffage électrique et maintient constante une température ordinairement de 25°.

» Pour les résistances de précision de 1 ohm par exemple la sensibilité des mesures de comparaison atteint l'ordre du millionième. Cette très grande sensibilité a permis de reconnaître d'une façon fort nette l'obligation de sceller les récipients dans lesquels les résistances de manganin sont placées. Les variations d'humidité de l'air extérieur, en agissant sur le vernis qui recouvre le fil, amènent des efforts de contraction ou de dilatation qui causent des anomalies dans les mesures de résistance.

» Pour toutes les résistances de haute précision, les contacts sont assurés par des cavaliers en cuivre amalgamé plongeant

dans des godets contenant du mercure, creusés dans les conducteurs à réunir.

» M. Dellinger, l'un des assistants du Dr Wolff, s'occupait, au moment de mon séjour à Washington, de la résistivité des cuivres les plus purs de provenance différentes, afin de pouvoir donner une base plus certaine aux mesures de résistivité des conducteurs industriels. La section des fils est déduite du poids par mètre en admettant la densité de 8,89.

» Le Dr Wolff, qui s'occupe aussi de la mesure des forces électromotrices, a décrit, dans des rapports publiés dans le *Bulletin* du Bureau, la construction des piles, les bains à température constante et les méthodes de mesure des éléments.

» Il y a là plusieurs centaines de piles étalons Weston et, parmi elles, celles qui servent de base pour les déterminations de force électromotrice. Le potentiomètre qui sert à la mesure permet les comparaisons au millionième de volt.

» *Unités absolues.* — Au premier étage se trouvait le laboratoire où étaient installées les expériences comparatives des voltamètres à argent.

» Dans la pièce voisine était l'électrodynamomètre absolu avec lequel M. Dorsey travaille depuis plusieurs années, en vue de déterminer la valeur de la force électromotrice de la pile Weston en fonction du mètre et du gramme. Il a la même disposition générale que celui du Laboratoire central d'Électricité réalisé pour les expériences de 1908; seulement, au lieu d'être double et symétrique, et d'ajouter les effets électromagnétiques sur les deux bras de la balance, l'appareil américain est simple et n'agit que d'un côté du fléau. De grandes précautions sont prises pour le maintien de la constance du courant et de la température. On sait en effet, Curie l'a signalé déjà il y a longtemps, quel trouble peut apporter à une pesée une faible différence de température entre le plateau et l'atmosphère ambiante.

» Pour les étalons d'induction mutuelle, de self-induction, qui ont été construits d'après les travaux de M. Rosa, Grover et de plusieurs autres physiciens du Bureau, on a employé souvent des fils de cuivre recouverts d'une couche d'émail flexible. L'isole-

ment est, paraît-il, au moins aussi bon et aussi sûr que celui que donne un double guipage de soie. L'isolant offre l'avantage d'occuper moins de place.

» Dans ce même bâtiment se trouvent les laboratoires de chimie, d'optique, où l'on étudie les méthodes d'analyses ou de recherches par l'emploi de la lumière polarisée. Citons aussi une installation de radiométrie et où le rayonnement de différents gaz a été étudié.

» La métrologie, à l'étroit pour l'importance de son travail, possède des comparateurs, une salle de balances de sensibilité et de force très variées.

» Dans le sous-sol est installée une seconde chambre contenant trois balances; la température et l'humidité y sont maintenues constantes. Dans une autre cave à température constante marche une horloge qui peut donner le temps dans les laboratoires par courant électrique et dont l'heure est contrôlée par télégraphie sans fil avec l'Observatoire de la Marine, qui est chargé du maintien de l'heure en Amérique.

» Citons encore les bureaux de l'administration, la bibliothèque et une salle de conférences dans laquelle le personnel du bureau s'assemble deux fois par semaine.

» *Bâtiment nouveau.* — Un second bâtiment d'une importance à peu près égale vient d'être terminé.

» Dans des sous-sols aménagés pour cet usage vont être installés de nombreuses machines pour les essais mécaniques des métaux et des matériaux de toute sorte. On commençait le montage d'une grande machine à essayer les métaux à la traction. Dans le rez-de-chaussée, plusieurs laboratoires sont prévus pour les vérifications et épreuves des produits fabriqués depuis les essais de ciment jusqu'aux cordes et aux étoffes.

» Des travaux sur la résistance du papier sont en cours d'exécution. Le Bureau aurait voulu essayer des échantillons fabriqués systématiquement avec des produits bien définis. Aucune fabrique n'a voulu contribuer au travail en se chargeant de cette besogne. Alors le Bureau a résolu de faire lui-même ce qu'il ne pouvait faire exécuter par les autres et d'avoir son usine. J'ai vu achever

le montage d'une de ces grandes machines modernes à fabriquer le papier et qui ne fonctionnera que pour des essais.

» Au premier étage est installée la Division de la chaleur. MM. Waidner et Burgess sont trop connus par beaucoup de travaux qui touchent à l'électricité pour ne pas citer leur nom et parler de leurs laboratoires.

» La méthode qu'ils préfèrent pour la mesure de températures est celle de la mesure de la résistance du platine. Ils ont étudié la méthode très complètement et réalisé un appareil commode et d'une grande précision.

» Pour pouvoir utiliser toute la sensibilité des appareils, il faut noyer tout l'ensemble des résistances du pont dans un bain de pétrole maintenu à température constante.

» L'électricité est employée pour obtenir les hautes températures nécessaires pour étalonner ou vérifier les pyromètres ou les couples thermo-électriques.

» Citons aussi les études des pyromètres optiques, la détermination des températures de fusion du tantale et du tungstène, et la température du filament de ces lampes pendant leur fonctionnement.

» Le service de vérification des thermomètres est un des plus actifs du Bureau; beaucoup d'essais sont effectués pour les particuliers.

» Une autre étude est en cours d'exécution : c'est la comparaison des méthodes et appareils employés actuellement pour déterminer le pouvoir calorifique des combustibles. Parallèlement à cette étude, on cherche à réaliser une échelle de corps bien définis, ayant un pouvoir calorifique connu et qui servirait soit à étalonner les appareils employés, soit à contrôler leurs indications.

» *Bâtiment des hautes pressions et des basses températures.* — Une série de machines spéciales à ce genre de recherches s'y trouve installées et tout l'équipement paraît parfaitement correspondre au but assigné.

» *Bâtiment de la force motrice et de la mécanique.* — Nous retrouvons l'électricité. A la salle des machines, avec les groupes

électrogènes à vapeur, avec les différentes génératrices à courant continu et à courants alternatifs, citons tout particulièrement un groupe de machines solidaires dont les induits sont montés sur le même arbre. La première est construite pour donner une force électromotrice aussi sinusoïdale que possible. La seconde machine a un nombre triple de pôles. Sa force électromotrice, combinée à la première, permet d'étudier l'effet de l'harmonique 3 avec des amplitudes qui ne dépendent que des excitations relatives et des déphasages qu'on peut faire varier graduellement en déplaçant, par le mouvement d'une vis sans fin, les inducteurs de la seconde machine par rapport aux inducteurs de la première; un troisième alternateur donne l'harmonique 5, et ainsi de suite jusqu'à l'harmonique 17. Cette machine a été utilisée dans des études de l'influence de la forme de la courbe sur les indications des compteurs et sur les pertes dans le fer.

» L'atelier comporte des machines bien choisies et une douzaine d'ouvriers. Un grand nombre d'appareils servant aux travaux y sont construits; ils sont précis et robustes, étudiés avec soin et faits par des ouvriers habiles.

» Le service de vérification des appareils à courant continu est établi dans une partie du rez-de-chaussée de ce bâtiment. Le courant nécessaire à l'étalonnement des ampèremètres est fourni par une batterie de gros accumulateurs dont on fait varier le couplage. L'intensité de courant maxima pour le moment est de 5000 ampères. La mesure en est faite avec un dix-millième d'ohm Otto Wolff.

» J'ai eu l'occasion de voir là un ampèremètre de M. Northrup, basé sur la dépression que subit le mercure sous l'influence d'un courant intense qui le traverse. A signaler aussi une étuve fort bien établie pour permettre de faire varier la température des appareils et de déterminer ainsi le coefficient de variations de leurs indications. On peut obtenir et maintenir à l'intérieur de l'étuve toute température comprise entre 0° et 40°. L'une des parois est formée par une glace à travers laquelle les lectures peuvent se faire avec facilité et précision.

» Dans la section des études magnétiques et des recherches en courants alternatifs, M. Burrow fait en ce moment une com-

paraison des différentes perméamètres industriels et une étude des meilleures conditions pour établir un appareil qui soit exempt des inconvénients reconnus dans les autres.

» Le type ayant été choisi et construit, l'activité du Bureau se tourne vers la détermination des constantes magnétiques de barreaux destinées à tarer ou à vérifier les appareils. Les méthodes les plus précises ont été appliquées à ce sujet. Des barreaux ont été envoyés en Europe, j'en ai rapporté au Laboratoire, et de l'examen des résultats on pourra tirer des conclusions intéressantes sur les méthodes de mesure.

» Le laboratoire de Photométrie a depuis longtemps au Bureau une grande activité. Je me borne à rappeler ici les comparaisons d'étalons lumineux qu'il a souvent entrepris en transportant une série de lampes en Europe.

» Le Bureau, par des études systématiques, s'est constitué plusieurs séries de lampes à incandescence étalons. Certaines de ces séries servent pour les mesures. D'autres sont conservées comme témoins, dans la petite salle à l'abri du feu et protégé par une double enceinte de gros murs en même temps que des étalons de longueur, de masse et de capacité.

» Afin de faire disparaître les difficultés de l'orientation des lampes devant le photomètre, on a l'habitude en Amérique de les faire tourner autour de leur axe à la vitesse de 200 tours par minute environ. Le support de la lampe est combiné de manière à être réglable en hauteur.

» Pour les mesures de lampes étalons, le photomètre ordinaire se trouve doublé. Deux bancs photométriques sont dans le prolongement l'un de l'autre, de part et d'autre de la lampe à étudier; deux lampes tarées se trouvent aux deux extrémités des bancs. Toute expérience peut donc se faire simultanément avec deux observateurs différents. Un dispositif très simple permet à l'opérateur d'inscrire le pointé photométrique qu'il vient de faire sur un cylindre enregistreur sans avoir chaque fois une lecture de graduation à faire. L'expérience est beaucoup plus rapide et l'observateur ne risque pas de modifier la sensibilité de sa rétime. Bien souvent les lectures photométriques successives sont suffisamment bien groupées pour qu'on puisse déterminer facilement et à la vue le point moyen

et par conséquent on n'a dans la suite qu'une seule mesure de longueur à effectuer. Les photomètres sont du système Lummer et Brodhum et les mesures électriques sont faites au potentiomètre.

» Un appareil pour la mesure de l'intensité moyenne sphérique, un mésophotomètre pour lampes à incandescence, est disposé dans une chambre spéciale : c'est l'appareil de Matthews qui a été décrit il y a déjà quelques années. Je note seulement ici qu'il étudie l'intensité lumineuse dans vingt-quatre directions et que, pour obtenir comme résultat l'intensité moyenne sphérique par intégration expérimentale, il faut que chacun des vingt-quatre groupes de deux miroirs soit réglé individuellement. La mesure est faite avec une lampe étalonée dont on fait varier au besoin l'éclairement au moyen d'un disque à secteurs pleins et évidés convenablement choisi, tournant devant l'écran du photomètre.

» Pour permettre des comparaisons d'éclairement, une petite pièce est munie de deux canalisations parallèles de tubes de Moore. L'un contient de l'azote et donne une couleur jaune légèrement orangé; l'autre est rempli avec de l'acide carbonique donnant de la lumière assez blanche, mais avec un moindre éclat.

» Les lampes en essai de durée sont disposées dans un local placé au second étage. Elles sont alimentées, comme nous aurons à le signaler dans d'autres laboratoires, par du courant alternatif dont la tension est maintenue constante par un régulateur Tirrell agissant sur l'excitation de l'excitatrice de l'alternateur.

FONCTIONNEMENT DU BUREAU OF STANDARDS.

» *Personnel.* — Le Bureau comporte actuellement comme personnel technique : un directeur, un physicien et un chimiste en chef; deux physiciens, huit physiciens et deux chimistes associés; vingt-quatre physiciens et cinq chimistes assistants; vingt-quatre assistants de laboratoires, plus dix-huit aides et apprentis de laboratoires, soit quatre-vingt-six personnes.

» Plus le personnel engagé pour des travaux momentanés. Par exemple, en ce moment, des recherches sur l'influence de la composition du gaz sur son pouvoir calorifique et sur son utili-

sation à l'éclairage occupent trois personnes, et le Dr Austin commence un travail sur la téléphonie ou la télégraphie sans fil.

» Le personnel administratif comprenait en 1908 dix-neuf personnes et a dû être augmenté notablement depuis cette époque (un secrétaire, un bibliothécaire, neuf employés, huit magasiniers, messagers, boys).

» Personnel des machines et de l'atelier en 1908 : un ingénieur mécanicien, quatre ingénieurs mécaniciens assistants, douze ouvriers, trois chauffeurs et onze employés divers dont trois jardiniers; en tout trente et une personnes.

» Soit au total cent trente-six personnes.

» Au moment où je me trouvais à Washington, le personnel de la division Électricité était presque exactement la moitié du personnel technique.

» *Budget.* — Aux États-Unis, l'année budgétaire est du 1^{er} juillet au 30 juin. Le budget pour l'exercice 1908-1909, avec un total de cent dix-huit personnes employées, était :

Traitement du personnel.....	619 371,20 ^{fr}
Matériel.....	201 828,40
Dépenses générales.....	74 315,75
Terrassement et jardin	14 914,30
Total.....	910 429,65

» Le budget voté pour l'exercice 1910-1911 est de 250 000 dollars, soit environ 1 250 000 fr (1).

» *Essais effectués.* — Dans les statistiques d'essais on distingue ceux qui ont été demandés par le gouvernement des États-Unis ou de l'un quelconque des États et les autres. Les premiers sont effectués gratuitement; les autres seuls sont réellement payés. Tous les essais sont cependant compris dans la colonne « Valeur totale des redevances ».

(1) En 1910, les dépenses du Laboratoire central d'Électricité ont été au total de 74 000 fr, dont 42 000 fr comme traitement pour les 17 personnes employées.

Divisions.	Nombres d'essais effectués.			Valeur totale des redevances. fr
	Pour les gou- vernements.	Pour les parti- culiers.	Total.	
Électricité.....	151	314	465	8 457,00
Photométrie.....	2 668	1 256	3 924	27 813,50
Poids et mesures...	12 481	948	13 429	29 297,25
Chaleur.....	3 812	9 129	12 941	17 238,10
Optique.....	1 287	29	1 316	6 810,00
Chimie.....	1 972	549	2 521	43 034,30
Industriels.....	2 082	122	2 204	37 298,65
Divers.....	1 176	113	1 289	5 011,75
Total.....	25 629	12 460	38 089	174 960,55

» Le total des deux sections Électricité et Photométrie, qui correspondent aux attributions du Laboratoire central d'Électricité, donne 4389 essais et une valeur totale de 36270,50 fr. Sur cette somme, 7481 fr sont entrés réellement dans la caisse (1).

» Durant l'exercice, le Bureau avait été chargé de recevoir diverses fournitures de lampes pour les services de l'État et qui se montaient à 500000 lampes.

» *Tarif.* — Nous croyons intéressant de donner quelques prix du tarif du Bureau of Standards et du Laboratoire central d'Électricité.

		B. of S.	L. C. E.
Ampèremètre à courant continu, courant maximum...	50 amp.	11,25	5
» » »	250	15	10
» » »	1000	37,50	20
Ampèremètre à courant alternatif, courant maximum.	50	15	10
» » »	250	22,50	15
» » »	1000	60	25
Compteur courant continu 5 kilowatts.....		15	20
» courant alternatif 5 kilowatts.....		15	30
Résistance de précision à 0,0001.....		15	50
Pile étalon force électromotrice à 0,0001.....		7,50	10
Photométrie 1 lampe à incandescence.....		7,50	5
» par lampe en plus.....		5	de 2 à 1

» *Travaux et publications.* — En dehors des essais demandés au Bureau, le personnel fait de nombreux travaux publiés ordinairement.

(1) Pendant l'année 1910, le nombre d'essais effectués au Laboratoire central d'Électricité a été de 1170, représentant une valeur de 59 000 fr.

rement dans son *Bulletin*. Cette publication comporte depuis l'origine en 1904 sept volumes contenant près de cent cinquante mémoires et travaux. Elle forme pour la métrologie un recueil des plus précieux. La dernière année, vingt-trois mémoires ont été publiés.

» Il faut citer aussi les circulaires que le Bureau adresse pour vulgariser dans le monde technique et industriel les méthodes de mesure les plus satisfaisantes. Après un exposé très net de la méthode recommandée et l'étude de la précision qu'on peut attendre des résultats, on trouve tous les renseignements nécessaires et pratique pour employer la méthode décrite pour préparer les échantillons qui doivent servir aux essais et pour éviter ou corriger les erreurs les plus à craindre. On indique naturellement aussi dans quelle condition les essais se font au Bureau. Je signalerai comme tout particulièrement intéressantes les circulaires sur les appareils de mesures électriques, sur les essais magnétiques et aussi sur les lampes à incandescence. Cette dernière contient les spécifications imposées par les services de l'État à ses fournisseurs.

» Il faut rappeler également devant vous que le Bureau est le grand champion du Système métrique en Amérique. Il en connaît et en apprécie tous les avantages, et lutte pied à pied pour favoriser et hâter son adoption. Mais il se heurte à une masse fort difficile à ébranler : cela se comprend sans peine, ne citons ici que les constructeurs qui sont maintenus dans leur routine par tout le matériel existant, par leurs dessins et leurs modèles.

» Aussi les ingénieurs, qui calculent maintenant leur machine et font l'avant-projet en se servant du système métrique, traduisent toutes leurs cotes en pieds et en pouces quand ils passent au dessin définitif. Malgré tout il faut espérer, car l'action du Bureau est constante et qu'il a su gagner tout au moins les Universités et les établissements purement scientifiques.

II. — LABORATOIRE D'ESSAIS INDUSTRIELS.

Electrical testing Laboratories. — New-York.

» Les Laboratoires d'essais électriques sont un établissement privé organisé comme une entreprise commerciale.

» Son but est d'effectuer, avec toute la précision désirable, les essais ou mesures électriques et photométriques qu'on ne veut pas ou qu'on ne peut pas confier aux laboratoires des usines.

» Le D^r Sharp, qui dirige ce laboratoire, limite son rôle aux applications industrielles; il abandonne au Bureau of Standard les questions d'étalons, les recherches et les mesures de haute précision qui exigent à la fois trop de temps, trop de soins et par suite trop d'argent pour pouvoir jamais être du rôle d'un laboratoire privé. Des essais industriels précis peuvent être obtenus dans des conditions acceptables comme prix de revient et cela par une étude approfondie des méthodes de mesure et par l'usage rationnel des appareils à lecture directe dits *de précision* qu'on peut fréquemment vérifier et étalonner au moyen des résistances et des piles étalons Weston qui sont étudiées au Bureau of Standard.

» D'abord spécialisé pour les essais photométriques sous le nom de Bureau d'essai pour les lampes (Lamp testing Bureau), cet établissement fut développé, son champ d'action étendu à tous les essais électriques. M. Sharp, dans un rapport qu'il fit au Congrès de Saint-Louis et dans des articles sur l'établissement qu'il dirige, parle souvent du Laboratoire central d'Électricité et semble même l'indiquer comme exemple et comme premier guide.

» *Description sommaire.* — Les laboratoires sont installés, dans une ancienne usine électrique où une sous-station, au bord de la rivière de l'Est, à la hauteur de la 80^e rue.

» Au rez-de-chaussée, la salle des machines. Le premier étage est affecté à la Photométrie; le second aux essais électriques et aux bureaux.

» Le personnel comprend, en dehors de M. Sharp et de ses chefs de service, une centaine d'assistants, d'inspecteurs, d'opérateurs et d'opératrices, d'employés et d'ouvriers.

» Les travaux sont répartis entre deux sections : la photométrie et les essais électriques comprenant les étalonnements d'appareils de mesure et les essais de matériel, câble, isolateurs, machines, etc.

» D'autres essais n'ayant plus aucun caractère électrique s'ajoutent à ceux-là, tels que la détermination des cendres, matières volatiles, pouvoir calorifique du charbon ou des combustibles.

Vérification de thermomètres, des matériaux, principalement de métaux, etc.

» *Essais électriques.* — Comme étalons, le laboratoire possède des résistances Otto Wolff de différentes valeurs qui ont été vérifiées à la Reichsanstalt ou au Bureau of Standard, et des piles étalons Weston étudiées à Washington. Un potentiomètre d'Otto Wolff sert aux comparaisons d'éléments étalons et aux mesures de précision.

» Les étalonnements d'ampèremètres ou de compteurs à courant continu se font comme d'ordinaire au moyen de résistances connues (en général construites par Otto Wolff), aux bornes desquelles on mesure la différence de potentiel, soit avec un millivoltmètre, soit le plus souvent au potentiomètre industriel (modèle Northrup). Le galvanomètre Desprez-d'Arsonval est très apprécié et d'un usage fréquent dans les laboratoires américains comme appareil de zéro.

» Les millivoltmètres, ou appareils à lecture directe Weston, sont naturellement les plus en usage.

» Les résistances de précision de 1 , $\frac{1}{10}$, $\frac{1}{100}$ ou de $\frac{1}{1000}$ ohm qui servent si fréquemment dans la technique pour mesurer les courants sont vérifiés facilement et dans de bonnes conditions de sensibilité et d'exactitude avec un appareil construit dans ces laboratoires. C'est une sorte de pont double de Kelvin dans lequel la mesure est faite par la variation des résistances des bras de proportion. L'appareil convient pour la comparaison de deux résistances égales ou dans le rapport de 1 à 10.

» Nous avons déjà eu l'occasion de dire que les essais de résistances de conducteurs en cuivre étaient rapportés, en Amérique, à une longueur et au poids linéaire. La longueur type des échantillons est de 4 pieds, soit 1,20 m environ. La section se détermine en prenant la densité de 8,89 et l'on admet que le coefficient de variation de la résistance avec la température est 0,0042.

» Le grand développement en courant alternatif des appareils de mesures munis de transformateurs a conduit les Electrical testing Laboratories à étudier une méthode pour déterminer d'une manière satisfaisante le rapport de transformation. La solution

employée est une méthode d'opposition de différences de potentiel instantané aux bornes de résistances appropriées et connues ⁽¹⁾. Pour pouvoir employer comme appareils de zéro des appareils aussi sensibles que les galvanomètres à courant continu, un contact tournant mû par un moteur synchrone redresse les différences de potentiel alternatives à opposer. Pour que la compensation puisse se faire, il faut que les deux courants soient parfaitement en phase; on obtient ce résultat au moyen d'une bobine d'induction mutuelle réglable.

» Les épreuves à haute tension d'isolateurs ou de matériel électrique sont effectuées souvent, un transformateur donne au maximum 250000 volts. Le primaire est alimenté par une génératrice à courant alternatif qui permet de faire monter progressivement la tension. Cette installation était en cours de modification, car le transformateur venait d'être installé dans le local qui était occupé autrefois par les chaudières (qui ont été supprimées), la force motrice électrique étant désormais seule utilisée.

» Dans l'organisation générale du laboratoire, citons un détail qui montre avec quel soin les précautions nécessaires sont prises.

» Le bon isolement de canalisation est une condition indispensable aux mesures, principalement chaque fois qu'entre en jeu une méthode d'opposition. L'été, à New-York, est très chaud et très humide. Dans ces conditions, sans précautions spéciales, le dépôt de rosée sur les murs à certains jours est suffisant pour altérer complètement l'isolement. Pour remédier à cet état de choses l'air du dehors passe auprès de surfaces métalliques refroidies artificiellement par une solution saline. L'eau condensée, l'air avant d'être chassé dans le laboratoire par le ventilateur est réchauffé de manière à faire ainsi tomber son état hygrométrique.

» *Photométrie.* — Un certain nombre de sociétés, qui consomment annuellement une quantité importante de lampes à incandescence chargent les Electrical testing Laboratories de vérifier si les clauses du marché sont remplies. Les prescriptions sont à peu près

⁽¹⁾ Voir, pour plus de détails, SHARP et CRAWFORD, *Récents développements dans l'exactitude des mesures en courants alternatifs* (Proceed. of Am. Ins. of Elec. Eng., juillet 1910).

toujours les mêmes. Une certaine proportion de lampes, 10 à 20 pour 100, prélevée sur la fourniture par un inspecteur, sont vérifiées à l'usine même de fabrication au point de vue de leur bonne construction, de leur intensité lumineuse et de leur consommation. Ensuite, la réception étant faite, on choisit environ 2 lampes par 1000 qui sont soumises aux épreuves de durée. Les résultats donnent droit à des retenues ou des primes sur le règlement ou peuvent amener la rupture du marché.

» Il y a 4 ou 5 inspecteurs, ayant chacun leur équipe d'opérateurs et d'employés (jusqu'à 11 personnes par équipe). Plusieurs sont installés à poste fixe dans les fabriques les plus importantes, ils ont un local cédé par l'usine et font les mesures au moyen des appareils et des étalons qui appartiennent au laboratoire d'essai. D'autres équipes voyagent et passent d'une usine à l'autre suivant les commandes et les livraisons à effectuer.

» Les lampes qui sont soumises à l'essai de durée sont seules envoyées à New York.

» Les lampes sont photométrées, allumées sous tension constante et l'on détermine par de nouvelles mesures au photomètre la durée qui correspond à une diminution d'intensité lumineuse de 20 pour 100.

» Quatre bancs photométriques, chacun avec leur équipe de 2 femmes, sont affectés à ce service. Les photomètres sont à tache d'huile et les appareils électriques à lecture directe de Weston. Les lampes sur le banc sont placées sur un support animé d'un mouvement de rotation autour de son axe. L'intensité lumineuse mesurée est l'intensité moyenne horizontale. Les montures étant à vis, le renversement du sens de rotation du moteur permet de changer très rapidement les lampes.

» Pour les essais de durée les lampes sont allumées toujours sur courant alternatif.

» Le laboratoire reçoit le courant de la distribution ordinaire de New York sous forme de courant triphasé. Le moteur ainsi alimenté actionne une génératrice monophasée, dont la tension est maintenue constante par un régulateur vibrant Tirrel, agissant sur le circuit d'excitation de l'excitatrice à courant continu du générateur. On estime le réglage de la tension exact à 0,25 pour 100 près.

» Ce courant alternatif est envoyé dans un transformateur avec des prises dont les tensions varient de volt en volt. De nombreuses canalisations et les commutateurs des tableaux font communiquer les rampes d'allumage avec le transformateur.

» Les rampes sont disposées dans un local spacieux, fortement ventilé. Les lampes sont placées horizontalement. L'essai de durée se fait à la tension correspondant à une certaine consommation spécifique à laquelle on amène la lampe par un essai photométrique préliminaire. Pour régler la tension aux bornes d'une lampe on intercale en série avec elle, entre les deux fils d'alimentation de la rampe, une résistance choisie pour absorber la fraction de volt convenable.

» Les tensions sont donc réglées individuellement douille par douille. Les différentes rampes correspondant à la même tension sont disposées suivant un même panneau vertical. Les panneaux sont placés à distance convenable les uns des autres et il entre dans cette installation 6000 douilles. Elles ne sont pas occupées toutes simultanément, mais il y a certainement des moments où 2000 lampes brûlent à la fois.

» Deux autres bancs sont montés avec des photomètres Lummer et Brodhum et des dispositifs potentiométriques pour les études des lampes étalons et les mesures plus spéciales ou plus délicates. Le laboratoire étudie et vend un assez grand nombre de lampes étalons à l'industrie électrique américaine. Le prix de ces lampes est de 15 à 20 fr.

» Pour l'étude des lampes à arc un mésophotomètre de Matthews est monté avec environ 20 miroirs disposés de part et d'autre de l'axe de la lampe. L'appareil permet de mesurer l'intensité lumineuse dans les différentes directions en recouvrant de velours noir les miroirs et en les découvrant ensuite successivement un à un.

» Si par une seule mesure on veut obtenir l'intensité moyenne sphérique, on interpose sur le trajet des rayons lumineux devant le photomètre un disque portant une série de verres fumés dont l'absorption a été déterminée et qui permet une intégration expérimentale, tous les miroirs étant découverts simultanément.

» D'autres appareils seraient encore à citer, soit pour l'étude de la répartition lumineuse, soit pour la mesure de l'éclairement, mais je bornerai là cette description.

» *Fonctionnement des laboratoires d'essais électriques.* — Je n'ai pas les documents suffisants pour apprécier l'activité de cet établissement. Il aurait été cependant intéressant de le comparer au Laboratoire central d'Électricité. J'ai noté seulement que le nombre d'essais électriques s'élevait environ à 700 et à 500 pour la Photométrie. Mais ils sont d'importance très variable et il est difficile de juger par là le travail correspondant.

» Ce chiffre est tout à fait comparable au nôtre; il m'a semblé qu'il en était de même pour la plupart des catégories d'essais, appareils de mesure à cadran (80), mesure de résistances, etc. Cependant les étalonnements de compteurs et les essais de machines m'ont paru moins fréquents qu'au Laboratoire, alors que les étalonnements de transformateurs de mesure (20) et les épreuves à haute tension (40) étaient au contraire plus nombreux.

» Dans la section de Photométrie, le nombre d'essais est de 500 environ mais cette indication n'est pas suffisante. J'ai noté que l'un des quatre ou cinq inspecteurs avait reçu pendant l'année 3600000 lampes ⁽¹⁾. On peut estimer à 20000 le nombre des lampes essayées pour la durée. Ces essais sont donc beaucoup plus développés à New York qu'en France.

» Il m'a semblé intéressant de comparer les prix de quelques essais aux Electrical testing Laboratories et au Laboratoire central d'Électricité, comme je l'ai fait déjà pour le Bureau of Standard :

	E. T. L.	L. C. E.
Ampèremètre à courant continu, courant maximum, 200 amp.	12, 50	5 ou 10
— — — — — 1000 amp.	30	20
Ampèremètre à courants alternatifs, courant maximum, 100 amp.	22, 50	10
Compteur courant continu, courant maximum, 75 amp.	20	20
— — — — — 1000 amp.	60	30
Compteur courants alternatifs, courant maximum, 25 amp.	27, 50	30
Essais de haute tension pour trois échantillons semblables jusqu'à 30000 volts.	10	40
Essais de haute tension pour trois échantillons semblables jusqu'à 100000 volts.	37, 50	110
Essai d'une lampe à arc, répartition lumineuse et intensité moyenne sphérique.	100	50
Essai photométrique des lampes à incandescence : la première.	5	5
Essai photométrique par lampe en plus de la première.	0, 80	2 ou 1
Essai de durée d'une lampe de 16 bougies, 3, 5 watts par bougie.	22	48

(1) En 1905, les Electrical Testing Laboratories avait reçu 13000000 de lampes.

» Dans l'ensemble, les prix de ce tarif sont très analogues aux nôtres. Cependant, dans certains cas, le Laboratoire central est meilleur marché; citons l'essai photométrique d'une lampe à arc et en général l'étalonnement des appareils parcourus par un courant assez intense.

» Par contre les essais de durée de lampes à incandescence aux Electrical testing Laboratories sont beaucoup plus économiques; la différence provient du prix de revient de l'énergie électrique. A New York, pour les essais, M. Sharp peut l'obtenir à très bon marché. C'est en effet une charge très constante et qui peut être rémunératrice pour l'usine génératrice, même à très bas prix.

» Comme je l'ai signalé au début de ces notes, on ne demande pas seulement des essais de matériel ou des étalonnements d'appareils, mais souvent de véritables études ayant un caractère de recherches systématiques. Le nom de M. Sharp est bien connu de tous les ingénieurs qui s'occupent de photométrie. Mais la plupart de ces travaux, faits dans un but industriel ou commercial, ne sont pas publiés, ils présentent dans leur ensemble une grande utilité pour l'industrie électrique américaine.

III. — LABORATOIRES D'USINES.

« General Electric Co », à Schenectady.

J'ai visité à Schenectady les laboratoires de recherches, de graduation des appareils de mesure et de Photométrie industrielle.

Laboratoire de recherches. — Le Dr Whitney, qui dirige le laboratoire de recherches, a bien voulu me le faire visiter lui-même. Les bâtiments ne sont pas luxueux; tous en bois, à deux étages, ils sont loin d'être à l'abri de l'incendie; mais une grande activité y règne et l'on ne craint pas d'allumer des fours électriques capables de réaliser des températures de l'ordre de 2000° à 3000°.

» Les salles ne sont pas de grande dimension, mais aucune n'est inoccupée; le personnel est nombreux; il est difficile d'avoir l'impression d'un travail de laboratoire plus intense. Des dactylographes inscrivent toutes les lectures des appareils dès qu'elles

sont faites par les expérimentateurs. On me dit que le Dr Witney sait admirablement choisir ses collaborateurs.

» Les recherches paraissent avoir pour but la lampe à incandescence à filament métallique. Il y a des fours électriques de différents modèles. J'en note particulièrement un chauffé par une résistance de carbone dans une enceinte étanche en graphite entourée elle-même de charbon. Ainsi à l'abri de l'air, on peut atteindre et même dépasser le point de fusion du platine, puisque le tantale et le tungstène ont pu être fondus.

» On expérimente aussi beaucoup les conditions dans lesquelles on peut obtenir un bon vide dans les lampes à incandescence et l'on étudie la manière dont la pression varie avec la durée d'allumage de la lampe. Ces études nécessitent l'emploi d'appareils fort complexes, entièrement en verre soudé : pour permettre tout à la fois l'obtention du vide, la mesure dans les meilleures conditions possibles de la très faible pression dans l'ampoule de la lampe. La manière dont le vide se conserve dépend, on le sait, de la manière dont la lampe a été traitée au moment où la pompe agit. Mais la nature des corps qui se trouvent dans l'ampoule peut aussi agir, ainsi que la nature du verre. Ces recherches demandent beaucoup de travail et de méthode avec une grande habileté expérimentale.

» On montre du fil de tungstène étiré fort fin. Il doit permettre de fabriquer industriellement les lampes au tungstène comme celles au tantale avec un filament unique.

» Le Dr Witney me fit voir quelques ateliers, et une automobile nous transportait rapidement dans cette usine de dimensions inusitées. Je cite seulement les fours électriques pour la fabrication des balais au charbon et du ferrotitane destiné aux électrodes des lampes à arc à la magnétite, et l'atelier des turbines à vapeur où des unités de 20 000 kilowatts étaient en construction pour Chicago et où une machine de 12 000 kilowatts tournait pour essais.

» Je me borne aussi à mentionner le laboratoire d'étalonnement des appareils de mesure, fort bien équipé, et j'ai remarqué, entre autres, une installation pour l'étude des transformateurs de mesure analogue à celle que j'ai signalée déjà dans les Electrical testing Laboratories de New York.

» Le *laboratoire de Photométrie industrielle* est nouvellement installé. Je ne reviendrai pas encore une fois sur les essais classiques de la lampe à incandescence avec le photomètre Lummer et Brodhum et sur les appareils destinés à mesurer avec une seule lecture l'intensité moyenne sphérique.

» Je citerai seulement deux appareils pour l'étude de la répartition lumineuse des lampes à arc, l'un avec un miroir à 45°, monté en porte à faux et pouvant tourner autour de l'axe photométrique; l'autre, vraiment original, dans une salle de vastes dimensions, au moyen duquel le photomètre et l'observateur se déplacent autour de la lampe à arc qui reste fixe.

» Il y a là aussi un dispositif pour faciliter la comparaison des effets produits par les différentes sortes de lumière.

» Supposez une rangée de plusieurs stalles de 0,60 m ou 0,80 m de large les unes à côté des autres, séparées par des cloisons uniformément peintes en noir. Dans chaque stalle est disposée une source de lumière différente, de manière que l'éclairement d'un écran blanc placé à 45° à la partie inférieure soit approximativement le même. Si l'observateur se recule il aperçoit plusieurs stalles à la fois, ce qui lui permet de comparer les teintes de la lumière sur les écrans blancs. Avec des écrans colorés ou des étoffes de couleurs variées on peut différencier plus complètement les teintes des sources.

» Une salle est disposée aussi avec trois systèmes d'éclairage équivalents au point de vue de l'éclairement. Arc, arc renversé éclairant par diffusion du plafond et lampes métalliques de forte intensité (400 bougies). En les allumant successivement on peut juger facilement de l'effet produit et la puissance dépensée. Des tableaux, des livres et même une table à dessin sont disposés dans ce salon de démonstration pour permettre à chacun les comparaisons à son goût.

« **National Electric Lamp Association** », Cleveland.

» L'Association nationale de la lampe électrique a été fondée en 1903; elle avait alors six employés; les services généraux occupent actuellement 200 personnes et dépensent approximative-

ment 2 500 000 fr par an. 20 sociétés sont adhérentes à l'Association; la plupart sont des manufactures de lampes; quelques-unes sont au Canada ou au Mexique.

» L'Association a pour but l'amélioration de la lampe électrique, le perfectionnement de sa fabrication et le développement de son emploi. Les recherches que chaque usine ne pourrait pas entreprendre individuellement sont centralisées, poursuivies jusqu'à leur réalisation dans les laboratoires de l'Association, bien installés et abondamment pourvus de toutes ressources, et les résultats de ces travaux, lorsque leur mise au point est complète, reviennent dans les usines adhérentes comme de production nouvelle, progrès dans la fabrication ou économies réalisées.

» On a donc organisé les trois divisions suivantes :

» Service des recherches, service technique industriel, service commercial. Mais cela n'a pas paru suffisant, et depuis deux ans est fondé un laboratoire de Physique qui doit rester étranger à toute préoccupation commerciale et l'Association de Sociétés purement industrielles est très justement fière d'avoir créé et de pouvoir entretenir une pareille institution dont le but est uniquement scientifique.

» *Laboratoire de Physique.* — M. Hyde a quitté le Bureau of Standard pour venir diriger le laboratoire de Physique. On a donné comme but à ses travaux toutes les questions qui touchent à la production de la lumière, à son utilisation ou à ses effets.

» Ce programme de vastes recherches appartient à la fois à la Physique et à la Physiologie; aussi M. Hyde a comme chefs de service deux physiciens, MM. Cady et Ives, et un physiologiste, le Dr Cobb. Trois assistants et un mécanicien complètent le personnel du laboratoire.

» Je laisse de côté, sans insister davantage sur les installations photométriques, les photomètres; cependant je veux rappeler que M. Hyde, qui a fait une étude très approfondie de l'emploi du disque de Talbot, à secteurs plein et évidé pour diminuer, dans un rapport connu d'avance, l'éclairement du photomètre, fait un grand usage de ces disques pour que la mesure photométrique puisse toujours se faire dans les conditions de bonne sensibilité.

» Je cite seulement un spectrophotomètre et les études préliminaires, pour faciliter son utilisation, des modifications apportées au photomètre pour augmenter sa sensibilité. Un oscillographe sert à des travaux sur les lampes métalliques employées en courants alternatifs.

» Des recherches ont été entreprises sur l'acuité visuelle dans différentes conditions d'éclairement et aussi quand l'œil est gêné par la présence d'une source lumineuse dans le champ de la vision. Le *test-objet*, suivant l'expression consacrée, n'est plus une échelle plus ou moins bien graduée de caractères de dimensions différentes, mais un champ formé par des raies de diffraction; on peut faire varier, à volonté et d'une manière continue, le nombre et l'épaisseur de ces raies jusqu'à ce que la plage d'abord uniformément grise prenne une apparence striée. Comme dans ces expériences physiologiques il est bon d'empêcher l'accoutumance et éviter les auto-suggestions, l'orientation des lignes peut être modifiée et l'observateur ne connaît pas d'avance suivant quelle inclinaison elles apparaîtront.

» Le laboratoire de Physique vient de sortir de la période d'organisation; il n'a pas eu encore le temps de produire, mais nul doute qu'avec le chef qui le dirige il ne soit bientôt connu de tous ceux qui s'occupent de l'étude physique de la lumière.

» *Section industrielle. — Service des recherches.* — Il se compose de deux laboratoires, l'un des recherches chimiques, l'autre d'études spécialisées à la fabrication du filament; c'est naturellement le fil de tungstène qui fait l'objet de tous les travaux. Les types de lampes construits par les usines de l'Association sont nombreux et il a fallu beaucoup d'efforts pour donner à la fabrication industrielle une aussi grande souplesse. On m'a montré dans ce laboratoire des fils de molybdène qui offrent de grands avantages pour constituer les crochets qui supportent les filaments. Le molybdène peut être étiré et passer à la filière, mais dans des conditions particulières de pureté et de température.

» Le service qui a comme but l'amélioration de la lampe est une véritable petite manufacture, montée de manière à produire 500 lampes par jour et dans laquelle on étudie les procédés qui

permettent de faire industriellement les meilleures lampes possibles dans les conditions les plus économiques. La fabrique est complète, depuis le laboratoire où l'on traite le minerai de tungstène et où l'on purifie par des traitements successifs l'acide tungstique jusqu'aux pompes à allure très rapide qui terminent la dernière opération délicate dans la fabrication de la lampe, le bon vide dans l'ampoule.

» J'ai été frappé, dans cet atelier, comme d'ailleurs souvent en Amérique, par le grand développement des machines qui accomplissent automatiquement des opérations que nous sommes habitués à voir effectuer à la main; en particulier, c'est une machine qui introduit le filament dans l'ampoule, chauffe progressivement le verre, fond le bord de manière à assurer la fixation du filament, la soudure et l'étanchéité de cette partie de la lampe. La participation de l'ouvrière se borne à mettre en place le filament dans une pince. La machine effectue ces différentes opérations en 6 périodes de temps égaux, entre ces opérations le plateau qui porte les lampes en fabrication fait $\frac{1}{6}$ de tour.

» A cette fabrique de lampes est adjointe un atelier de construction mécanique. C'est là qu'on fabrique les machines qui formeront l'outillage des usines adhérentes. On comprend qu'il soit nécessaire d'essayer complètement et de mettre au point sur une fabrication industrielle les machines qui seront expédiées parfois très loin et qui doivent cependant être parfaitement réglées pour fabriquer d'une manière satisfaisante un produit aussi délicat et aussi complexe qu'une lampe à incandescence.

» *Service des essais.* — Voilà les adhérents de l'Association munis de bonnes machines et de bons procédés, cela n'est pas tout; il faut s'assurer que la fabrication est bien conduite et que les lampes fabriquées donnent bien tout ce qu'elles doivent donner, c'est ce que vérifie le service d'essais sur des prélèvements faits sur la fabrication de chaque usine.

» On essaie aussi les lampes nouvelles, les produits des manufactures concurrentes ou étrangères et l'Association se vante de connaître par ses propres essais la production de toutes les fabriques du monde.

» Dans les sous-sols du bâtiment sont établies les machines génératrices de courant, les batteries nécessaires aux essais. Au premier étage nous trouvons des chambres photométriques établies toujours sur le même modèle. vingt mille lampes environ passent par mois devant les photomètres.

» La vérification de la bonne fabrication des usines comporte aussi des essais de durée. Il se fait comme dans les autres laboratoires avec du courant alternatif à tension constante maintenue par un régulateur Tirrell. Afin de diminuer les frais d'établissement la réalisation des rampes d'allumage est différente.

» Les lampes sont installées tout à fait au sommet de l'usine, dans une cage entièrement en fer et en verre. Les rampes sont formées de fer en U et fixées sur la charpente métallique.

» Les douilles, toutes à vis, sont montées directement sur ce fer, qui forme ainsi pôle commun général. Les dix lampes placées sur une rampe sont alimentées en dérivation, à la même tension, par le circuit secondaire d'un petit transformateur dont le primaire est connecté au circuit maintenu à tension constante.

» Le laboratoire possède un grand nombre de ces transformateurs à primaires identiques mais à secondaires suivant les besoins et dont les connexions sont très faciles à établir.

» Plus de vingt-cinq mille lampes sont essayées annuellement pour la durée. Quant à la sanction de ces essais elle est fort simple : l'usine, dont la fabrication est la moins satisfaisante, est mise à l'amende ; sa part contributive pour l'entretien de l'Association se trouve augmentée d'autant.

» *Service commercial.* — Dans les archives du service des essais le service commercial puise les documents nécessaires pour des articles techniques dans les journaux. On rédige de nombreuses publications commerciales et en particulier un bulletin périodique qui est très complet en renseignements précis sur les lampes et qui fournit aux ingénieurs tous les chiffres nécessaires pour pouvoir établir un projet étudié.

» On choisit ainsi les abat-jour ou réflecteurs qui conviennent le mieux aux lampes et l'on provoque au besoin leur fabrication.

» Enfin on s'efforce de faire connaître les lampes fabriquées

par les membres de l'Association et de deviner les désirs que la clientèle pourrait manifester.

» Une grande salle de conférences se trouve au premier étage du bâtiment et, comme annexe, il y a un laboratoire et une salle de photométrie disposée pour l'enseignement.

» C'est que l'Association reçoit des élèves, envoyés par les différentes usines, qui viennent recevoir la formation la mieux appropriée aux services qu'ils doivent rendre dans la suite de leur carrière. Ils entendent des cours, ils apprennent à manipuler le photomètre et ils se mettent au courant des derniers progrès de la fabrication en voyant effectuer sous leurs yeux les différentes manipulations de l'usine d'essais.

» Cette belle manifestation de la puissance considérable qui résulte de l'association m'a beaucoup intéressé. Il est certain que les efforts centralisés ont amené des résultats qu'ils n'auraient jamais pu obtenir en restant isolés.

» Les laboratoires d'enseignement que j'ai visités : du professeur Pupin de l'Université Colombia, de l'Université Mac Gill (professeurs Herdt et Barnes), de l'École Polytechnique de Montréal, de l'Université d'Harvard (professeur Kennelly), de l'Institut technologique du Massachusetts (professeurs Jackson et Pender), ne peuvent être utilement décrits qu'en parlant aussi de l'enseignement, et cela m'entraînerait trop loin.

» Je veux seulement vous dire qu'à l'Université Mac Gill, à Montréal, le professeur Herdt a dû installer, par suite des demandes qui lui étaient faites, un laboratoire d'essais. Il a déjà trois personnes occupées à ce service, étalonnements d'appareils, mesures de résistance; il installait une photométrie. En même temps le professeur Barnes, dont le nom est bien connu en Physique, s'occupe des unités électriques. Quand j'ai visité son laboratoire un de ses assistants déterminait la force électromotrice de l'élément Weston avec un électrodynamomètre absolu à torsion de la forme générale indiquée autrefois par Weber. Déjà de nombreuses piles étalons ont été construites et ces éléments sont très comparables à ceux du Dr Wolff au Bureau of Standard.

» Comme la prospérité du Canada a beaucoup augmenté ces derniers temps et que le développement de l'électricité y est considérable, je ne doute pas que ces deux services soient les débuts d'un nouveau laboratoire national d'électricité qui viendra d'ici peu adjoindre ses travaux aux autres pour hâter de plus en plus les progrès de la Science et de l'Industrie. »

M. le PRÉSIDENT. — « La communication de M. Laporte met une fois de plus en relief la munificence avec laquelle sont dotés les laboratoires américains ; dans nombre d'autres pays étrangers, il en est de même : cette situation appelle la plus sérieuse attention.

» La Société internationale des Électriciens a largement contribué à maintenir jusqu'ici la France au premier rang pour les travaux d'électrométrie ; elle a rendu d'importants services à l'industrie ! Notre Société mérite donc les appuis et les concours qui lui sont nécessaires pour persévérer efficacement dans cette voie : j'ai confiance qu'ils ne lui feront pas défaut.

» Je remercie M. Laporte des renseignements qu'il nous a apportés ce soir. »

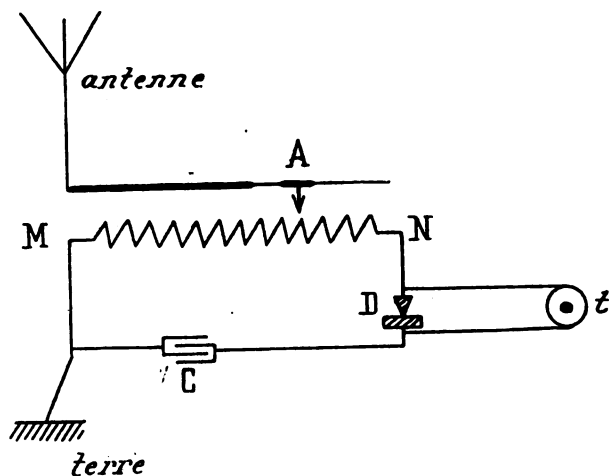
La séance est levée à 10 h 55 m du soir.

CORRESPONDANCE.

A propos de la communication récente de M. P. Jégou sur les récepteurs simplifiés propres à être utilisés à la réception des signaux horaires radiotélégraphiques (séance du 1^{er} février), nous avons reçu de M. Tissot une Note par laquelle ce savant expérimentateur rappelle qu'il s'est préoccupé à diverses reprises de l'établissement de pareils récepteurs :

M. Tissot : « Dès le mois de janvier 1908, j'ai présenté au Bureau des Longitudes, en vue de la réception des signaux horaires à bord des bâtiments de commerce, un récepteur simplifié, et établissais ultérieurement, avec le concours de M. F. Pellin, un modèle de maniement assez simple pour pouvoir être confié à n'importe quel caboteur, et de prix assez modique pour suppléer avec avantage à l'achat d'un chronomètre ⁽¹⁾.

» L'appareil se compose d'un détecteur d'oscillations électriques associé à un dispositif d'accord qui permet de l'utiliser avec une antenne quelconque et d'un chronographe pour prendre les comparaisons horaires.



» Le détecteur utilisé est un détecteur à contacts solides (sulfure de cuivre *artificiel* et oxyde de zinc *fondue*) aux bornes duquel est disposé en dérivation un récepteur téléphonique de grande résistance.

» L'emploi d'un pareil détecteur apporte une grande simplification au montage

(¹) Cet appareil a été présenté à l'Académie des Sciences par M. Lippmann (séance du 2 novembre 1908).

par la suppression de toute source auxiliaire. Comme l'appareil est destiné en principe à recevoir les signaux horaires de la tour Eiffel, c'est-à-dire des ondes de longueur déterminée et toujours la même, le dispositif d'accord a pu être notablement simplifié.

» Le *secondaire* du résonateur est *fixe* et constitue, avec un condensateur également invariable, un circuit de résonance qui a été accordé *une fois pour toutes* sur la période des ondes émises par la tour Eiffel (2250^m environ).

» Le *primaire* du résonateur est constitué par les spires du solénoïde comprises entre la terre et le seul curseur mobile A.

» L'adoption d'un circuit de résonance *fermé* comme circuit secondaire rend les effets sélectifs marqués. D'ailleurs, si la disposition adoptée permet au récepteur d'éliminer dans une large mesure les signaux parasites, elle a également pour effet de le rendre incapable de recevoir d'autres émissions radiotélégraphiques que celles qui proviennent de la tour Eiffel.

» Le récepteur est donc *spécialisé*. Pour compléter cette spécialisation du récepteur, intéressante à obtenir, car elle répond à certains desiderata de l'Administration des P. T. T., la course du curseur A a été limitée par un butoir (plus exactement par un accroissement d'échantillon de la réglette), de sorte qu'on ne peut accorder l'antenne sur des ondes plus courtes que 1800^m environ.

» L'opération de réglage est alors des plus simples : elle consiste à déplacer l'unique curseur mobile le long du solénoïde à partir du butoir jusqu'à ce qu'on entende au téléphone le son le plus fort.

» Avec un récepteur aussi étroitement spécialisé, on ne peut compter sur des émissions étrangères lointaines pour régler la sensibilité même du détecteur.

» Il est cependant indispensable de pouvoir vérifier le fonctionnement normal du détecteur avant de procéder à la réception des signaux horaires radiotélégraphiques.

» On peut pour cela avoir recours à l'emploi du dispositif bien connu de la *sonnerie à antenne*. Mais on obtient des résultats plus certains en tirant parti de la propriété que présentent les détecteurs *rectifiants* de se laisser traverser par des courants de valeurs inégales lorsqu'on leur applique des forces électromotrices constantes de sens opposé.

» Le dispositif de contrôle comprend alors un élément de pile sèche, un commutateur inverseur et un galvanoscope.

» Pour s'assurer du bon fonctionnement du détecteur, on l'intercale dans le circuit précédent par le jeu d'une fiche qui coupe le circuit du récepteur téléphonique.

» En inversant le sens du courant à l'aide du commutateur, il doit se produire une déviation franche du galvanoscope pour l'une des positions de l'inverseur, tandis qu'il ne se produit pas de déviation sensible pour l'autre position.

» S'il en est autrement, la sensibilité du détecteur n'a pas la valeur voulue, et il convient de la modifier en changeant les points de contact jusqu'à ce que l'épreuve donne un résultat satisfaisant. »

Nous donnons ci-dessous les remarques que suggère à M. Jégou la Note précédente :

M. Jégou : « Le récepteur horaire que décrit M. Tissot repose sur l'emploi d'un détecteur solide (sulfure de cuivre artificiel et oxyde de zinc fondu) et, comme tel, rentre évidemment dans la catégorie des récepteurs très simplifiés qu'on peut créer en faisant usage des détecteurs à cristaux qui n'exigent aucune source électrique auxiliaire.

» Le récepteur que j'ai créé est un montage simplifié du récepteur classique avec détecteur électrolytique, très apprécié à cause des qualités de robustesse, de régularité de fonctionnement et d'indéréglabilité sous l'action des chocs et trépidations qui le caractérisent et l'indiquaient pour réaliser un appareil susceptible d'être mis entre des mains inexpérimentées.

» D'ailleurs la sensibilité des détecteurs électrolytiques ne dépend que des pointes sensibles et, celles-ci étant interchangeables, il est facile de s'assurer de leur sensibilité avant de les utiliser ou au moment de leur fabrication; aucun essai de réglage de la sensibilité n'est donc à opérer sur le récepteur lui-même, ce qui évite d'avoir à emporter avec le récepteur les dispositifs nécessaires pour contrôler sa sensibilité.

» D'autre part, je viens aussi d'étudier, pour répondre au désir de l'Administration des P. T. T., un dispositif qui empêcherait les installations horaires de recevoir les messages radiotélégraphiques.

» Ce dispositif met à profit la forme conventionnelle et toujours uniforme donnée aux signaux horaires (signaux préliminaires pendant la minute qui précède le signal horaire proprement dit, lesquels signaux sont répétés à trois reprises et à 2 minutes d'intervalle).

» En principe c'est un mécanisme électrique ou mécanique (mouvement d'horlogerie) qui, associé au récepteur horaire par des connexions établies une fois pour toutes, assure la mise à la terre de l'antenne à l'état de repos ou de non-service, ce qui la rend inutilisable, à moins de la couper en un de ses points, pour actionner d'autres récepteurs clandestins. Ce mécanisme se déclenche aussitôt qu'on veut utiliser le récepteur (décrochage des écouteurs téléphoniques pour les récepteurs au son) et il a pour effet de couper et rétablir tour à tour la connexion de l'antenne avec le sol.

» Le temps pendant lequel l'antenne n'est pas à la terre correspond à une période pendant laquelle le récepteur est en état parfait pour déceler les signaux hertziens; ce temps est alors choisi de façon qu'il ne soit pas assez long pour permettre de recevoir un nombre suffisant de signaux radiotélégraphiques pour qu'on puisse comprendre le sens des messages. D'autre part, ces instants de réception, en se répétant périodiquement et assez rapidement, sont combinés de telle sorte qu'ils correspondent au moins à deux signaux horaires sur les trois qui sont émis et qu'ils laissent percevoir également quelques signaux préliminaires.

» Ainsi ce dispositif, dont l'exposé précédent n'indique que le principe, empêche

aussi bien de recevoir les messages radiotélégraphiques de la tour Eiffel que ceux des postes installés dans le voisinage des récepteurs horaires.

» PAUL JÉGOU. »

BIBLIOGRAPHIE.

Les substances isolantes et les méthodes d'isolement utilisées dans l'industrie électrique, par Jean ESCARD. — Paris, Gauthier-Villars, 1911; 1 vol. in-8°, broché.

Le travail de M. Jean Escard expose en détail les propriétés des isolants; la documentation est assez complète et, comme tel, ce Recueil est intéressant à consulter.

Génératrices de courants et moteurs électriques. Introduction à l'étude de l'Électrotechnique appliquée, par E. GUTTON. — Paris, Dunod et Pinat, 1911; 1 vol. in-8°, broché.

Cet Ouvrage reproduit les Leçons professées à l'Institut électrotechnique de Nancy.

Il a pour but de préparer l'étude purement technique de la construction des machines, à l'exclusion du projet d'exécution et de la construction des machines.

Régulation des groupes électrogènes, par L. BARBILLION (première et deuxième Parties). Paris, L. GEISLER, 1910; 2 vol. in-8°, brochés.

Nos 38 et 39 de la publication de l'*Encyclopédie électrotechnique*.

La première Partie contient l'exposé théorique de la régulation et la seconde Partie, entre autres, la description de quelques types de régulateurs, le calcul du volant et l'étude combinée des réglages mécaniques et électriques.

Recueil de problèmes avec solutions sur l'Électricité et ses applications pratiques, par H. VIEWEGGER, professeur à l'Institut électrotechnique de Mittweida (Saxe). Traduction française de G. CAPART, Ingénieur civil des Mines. Deuxième édition, revue, corrigée et augmentée de nouveaux Chapitres. Paris, H. Dunod et E. Pinat, éditeurs.

M. Wieweger, bien au courant par sa situation dans l'enseignement technique des lacunes de la plupart des Ouvrages de cet ordre, a rassemblé une série de questions qu'il présente sous forme d'exemples pratiques avec calculs à l'appui.

Son Ouvrage est, en somme, le complément des Traités parfois trop confinés dans la théorie et laissant, trop souvent aussi, les élèves embarrassés pour en tirer un parti efficace.

M. Wieweger a fait par là un excellent effort de vulgarisation; ses exercices mettent à la portée de tous, en des applications concrètes, la manipulation des formules théoriques.

Après le succès de deux éditions allemandes, M. Capart, ingénieur à la Société Brown Boveri, et qui, comme tel, était bon juge de la valeur de la publication de M. Wieweger, a été bien inspiré de se consacrer à la seconde édition de la traduction française.

A citer parmi les problèmes les plus intéressants, le calcul des machines à courant continu à pôles auxiliaires, celui d'un survolteur, et la question des groupes moteurs-pompes centrifuges.

La technique pratique des courants alternatifs, à l'usage des électriciens, contre-maitres, monteurs, etc., par G. SARTORI, professeur à l'Institut technique supérieur de Milan et à l'École industrielle de Trieste. 3^e édition française, traduite et complétée par J.-A. MONTPELLIER, rédacteur en chef de l'*Électricien*. Tome I : *Exposé élémentaire et pratique des phénomènes du courant alternatif*. In-8 de x-642 pages, avec 341 figures. Paris, H. Dunod et E. Pinat, 1910.

La technique pratique des courants alternatifs de M. G. Sartori est bien connue parmi les électriciens. Deux éditions françaises témoignent de la faveur rencontrée par cet Ouvrage dont le premier Volume, présenté ici, atteint sa troisième édition.

Il est bon de rappeler que ce Traité a été conçu suivant un plan permettant de mettre les phénomènes relatifs aux courants alternatifs à la portée de ceux qui n'en ont pas la pratique.

Cette nouvelle édition contient des compléments nombreux sur les appareils de contrôle : phasemètres, fréquencemètres; sur les transformateurs de tous genres et sur les isolateurs et parafoudres.

Éléments de Calcul vectoriel, par C. BURALI FORTI et B. MARCOLONGO, traduit par S. LATTÈS, de l'Université de Montpellier, 1 vol. in-8 de 229 pages et 20 figures, Paris. Hermann et fils, éditeurs, 1911.

Le calcul vectoriel, qu'il ne faut pas confondre avec la représentation vectorielle usitée pour les grandeurs sinusoïdales, en Électrotechnique, a pour objet de serrer, de plus près que la théorie des quaternions d'Hamilton, les conceptions de la Géométrie pure. Ce mode de calcul, imaginé par Wessel, fut exposé pour la première fois en 1797 dans un essai sur « la représentation de la direction » et développé surtout par Grossmann, mathématicien allemand né il y a près d'un siècle.

Ce Livre, le premier publié sur ce sujet, en Italie, est si clair que l'on comprend que le traducteur se soit donné la satisfaction de le faire connaître en France. Il est divisé en deux Parties. La première expose ce que sont les opérations et fonctions vectorielles, fonctions de nombres, fonctions de points; c'est la partie théorique à proprement parler.

La seconde Partie est réservée aux applications : à la géométrie, au calcul intégral, à la mécanique, à l'hydrodynamique, à l'élasticité, à l'électrodynamique, etc.

Dans un appendice, les auteurs font ressortir les avantages relatifs aux formes géomé-

triques de Grossmann et aux quaternions d'Halmilton, ce qui permet au lecteur de bien se rendre compte des ressources particulières aux deux systèmes de calcul.

Les auteurs italiens ont adopté des notations particulières, facilitant l'emploi du calcul vectoriel, et le traducteur a eu le grand mérite de rendre très exactement leur manière d'exposition de ce difficile sujet.

Toute la Chimie minérale par l'Électricité, par J. SEVERIN. Seconde édition, Paris, Dunod et Pinat, 1910.

La première édition de ce Livre, aussi intéressant que bien documenté, a été présentée dans le *Bulletin*, en novembre 1908. Rappelons que l'auteur y exposait ses méthodes personnelles pour l'obtention de presque tous les composés de la chimie minérale par voie électrolytique.

La seconde édition est une réimpression de la première, avec addition d'un complément où M. Séverin fait connaître ses recherches les plus récentes et où il indique quelques améliorations apportées à la préparation de certains produits, en vue d'augmenter le rendement des opérations ou d'obtenir des produits plus purs. Quelquefois les recherches nouvelles ont eu pour objet de démontrer la pureté absolue de certains composés qu'on aurait pu soupçonner contenir des traces de produits étrangers.

En résumé, profitant de cette seconde édition, l'auteur a parachevé une œuvre que voici maintenant tout à fait à jour des derniers progrès.

Traité de Chimie générale, par W. NERNST, traduit de l'allemand par A. CORVISY. Première Partie, Paris, A. Hermann et fils, 1911.

Cet Ouvrage est célèbre en Allemagne et le nom de l'auteur suffit à faire concevoir qu'il s'agit d'un traité présenté sous une forme aussi personnelle que moderne. Cette première Partie, traduite sur la 6^e édition allemande, s'occupe des propriétés générales des corps ainsi que de la constitution de l'atome et de la molécule. Le traducteur s'est attaché à serrer le texte de très près, le rendant avec exactitude et clarté. Il y a réussi, à notre avis.

Dans une Introduction, on rappelle quelques principes fondamentaux de la Physique moderne, puis le professeur Nernst étudie successivement les états gazeux, liquides, solides; les mélanges physiques et les solutions étendues; la théorie atomique, l'architecture de la molécule, les états de dissociation, la radioactivité, l'état colloïdal, devenu un chapitre important, à cause des procédés de fabrications des filaments de tungstène pour lampes à incandescence, etc.

Dans le dernier Chapitre sont réunis et discutés les travaux et les théories relatifs à la grandeur des molécules, en valeur absolue. Avec ses 500 pages, ce Volume n'est encore qu'une faible part du grand traité de Nernst. Les autres Parties de la traduction sont en préparation.

LISTE DES OUVRAGES

OFFERTS A LA SOCIÉTÉ INTERNATIONALE DES ÉLECTRICIENS.

(Suite.)

La Bibliothèque est ouverte aux Membres de la Société, tous les jours
de 3 heures à 6 heures, excepté les dimanches et jours de fêtes,
12, rue de Staël.

France.

Distributions d'énergie électrique. Loi du 15 juin 1906 et règlements annexes. Paris,
Ch. Béranger, 1911; 1 vol. in-8, cartonné toile. (Don de l'éditeur.)

Moteurs électriques à courant continu et leurs dispositifs de commande, par P.-J.

DENIS. Paris, Augustin Challamel, 1911; 1 vol. in-8, broché. (Don de l'éditeur.)

Traité juridique de l'industrie électrique, par Paul ISTEEL et E. LÉMONON. Paris,
Marchal et Godde, 1911; 1 vol. in-8, broché. (Don des éditeurs.)

BULLETIN

DE LA

SOCIÉTÉ INTERNATIONALE

DES

ÉLECTRICIENS.

SOMMAIRE.

Compte rendu de l'Assemblée générale et de la réunion mensuelle du 5 avril 1911 : Admission de Membres titulaires, p. 174. — Membres décédés, p. 174. — Don à l'École, p. 174. — Rapport de la Commission des comptes (M. **Cellerier**), p. 174. — Rapport du Comité d'administration (M. **le Secrétaire général**), p. 178. — Compte rendu des travaux du Laboratoire central et de l'École supérieure d'électricité (M. **P. Janet**), p. 180. — Situation financière et bilan de la Société au 31 décembre 1910, p. 190.

Nouvelle lampe à arc en vase clos avec charbons minéralisés (M. **Aliamet**), p. 195. — Sur les coefficients d'inductance (M. **Boucherot**), p. 211.

Résultats des élections pour le renouvellement du Bureau, du Comité d'administration et de la Commission des comptes, p. 223. — Allocution de M. **A. Bochet**, président sortant, p. 225.

CORRESPONDANCE, p. 228.

BIBLIOGRAPHIE, p. 229.

OUVRAGES OFFERTS, p. 232.

COMPTE RENDU

DE

L'ASSEMBLÉE GÉNÉRALE ANNUELLE

ET DE LA

RÉUNION ORDINAIRE MENSUELLE

du mercredi 5 avril 1911 ⁽¹⁾.

PRÉSIDENCE DE M. A. BOCHET.

La séance est ouverte à 8 h 35 m du soir et le procès-verbal de la dernière réunion mensuelle est adopté.

(¹) La Société n'est pas solidaire des opinions émises par ses Membres dans les discussions, ni responsable des Notes ou Mémoires publiés dans le *Bulletin*.

Il est donné connaissance des Ouvrages offerts à la Bibliothèque de la Société (voir p. 236) et des demandes d'admission suivantes :

Decombe (Georges), Ingénieur à la *Société française des Câbles électriques*, 45, rue de la République, à Lyon (Rhône). — Présenté par MM. Delon et Grosselin.

Delamare (Albert), Ingénieur, Directeur de la *Maison Landis et Gyr*, 17, rue Lamarck, à Paris. — Présenté par MM. Ch. David et A. Durand.

Dieringer (Georges-Marcel), Service des installations, *Maison Bréguet*, 27, rue de Marmagne, à Bourges (Cher). — Présenté par MM. Janet et Chaumat.

Guibert-Lassalle (René-Léon-Pierre), Ingénieur attaché au *Cabinet de brevets d'invention Pataty*, 13, rue Grange-Batelière, à Paris. — Présenté par MM. Ilievici et Mazen.

Heugues (Robert-Paul-Joseph), Ingénieur de la *Compagnie d'Électricité Ouest-Lumière*, 4, rue Ogereau, à Bois-Colombes (Seine). — Présenté par MM. Berland et Tavernier.

Journée (Marcel), 89, rue de Flandre, à Paris. — Présenté par MM. Bochet et Geoffroy.

Miffler (Lucien), Sapeur à la 4^e compagnie du 6^e bataillon du 3^e régiment de Génie, à Verdun (Meuse). — Présenté par MM. Chaumat et Janet.

Ces candidats sont élus Membres titulaires de la Société internationale des Électriciens.

M. le PRÉSIDENT fait part du décès de MM. *G. Clamond*, *Maurice Joly*, *Pavie* et *Rouart*; il en exprime les regrets de la Société.

Des remerciements sont adressés à la *Compagnie F. A. C.* pour un don de 1000 fr qu'elle a fait à l'École supérieure d'Électricité.

RAPPORT DE LA COMMISSION DES COMPTES POUR L'EXERCICE 1910.

M. CELLERIER, *rapporteur*. — « Messieurs, la Commission des comptes pour l'Exercice 1910, que vous avez nommée dans l'Assemblée générale du 6 avril de la même année, a l'honneur de vous exposer les résultats de ses travaux.

» Elle a contrôlé la parfaite exactitude des écritures du Trésorier et l'existence des différentes valeurs figurant à l'actif de la Société.

» Les comptes et le bilan pour l'exercice 1910 sont classés en trois divisions :

- I. Services généraux,
- II. Laboratoire,
- III. École.

Ils ont donné lieu aux observations suivantes :

» I. *Services généraux*. — L'avoir de ce compte, qui était au 1^{er} janvier 1910 de 169409,45 fr est passé, au 31 décembre, à 169019,50 fr; il a donc diminué de 389,95 fr.

» Les dépenses de l'exercice se sont élevées à 47181,66 fr et les recettes ont été seulement de 46791,71 fr.

» *Recettes*. — Les cotisations de l'exercice se sont élevées à la somme de 30320 fr, en augmentation de 480 fr sur celles de 1909. D'autre part, une somme de 2136,35 fr figure au crédit de l'exercice sous le titre « Dons avec affectations spéciales ». Cette somme est le produit d'une souscription, de bienfaiteurs industriels, pour permettre la continuation des essais sur les unités et l'envoi en mission, en Amérique, de M. Laporte.

» La Commission croit de son devoir de vous signaler, malgré leur modestie, les noms de ces généreux souscripteurs, savoir :

MM. Carpentier,
Hillairet,
Javaux,
Larnaude;
La Compagnie continentale Edison,
La Société L'Éclairage électrique,
La Société Parisienne pour l'Industrie des Chemins de fer,
La Maison Bréguet.

» Les résultats des travaux de M. Laporte, à Washington, vous ont été exposés, en partie, et figurent au *Bulletin* du mois de mars.

» Sur la somme ainsi recueillie, il a été versé 1911,90 fr au Laboratoire, et il reste en caisse 224,45 fr qui seront utilisés cette année.

» *Dépenses*. — Les montants des différents chapitres sont normaux. Le coût du *Bulletin* est cependant en augmentation (21399,86 fr au lieu de 19142,75 fr). Il y a lieu de faire remarquer que l'augmentation du nombre des membres de la Société a nécessité une augmentation du tirage.

» Le fonds social inaliénable est constitué par 161 cotisations libérées et 4 demi-cotisations libérées, valant ensemble 40750 fr et par 4149,50 fr de dons, sans affectation spéciale, soit au total 44899,50 fr.

» Ce fonds social est représenté au 31 décembre 1910 par

46639,03 fr de valeurs diverses. Les prescriptions de l'article 12 de nos statuts à l'égard de ce fonds sont donc bien observées.

» II. *Laboratoire.* — L'avoir au 1^{er} janvier 1910 était de 410773,42 fr; il est au 31 décembre de 415127,62 fr, soit une augmentation de 4354,20 fr, représentant la différence entre les recettes et les dépenses.

» *Recettes.* — Les recettes ont été, en 1910, de 78399,70 fr contre 73660,30 fr pendant l'année 1909.

» Cette augmentation des recettes provient de ce que les redevances pour essais et étalonnages sont passées de 48642,40 fr en 1909, à 59501,95 fr en 1910, en augmentation sensible de 10859,55 fr, soit d'environ 23 pour 100.

» La Commission, en vous signalant ce remarquable résultat, vous propose de féliciter notre directeur du Laboratoire et ses distingués collaborateurs.

» Cette excellente situation a permis entre autres d'abaisser la subvention de la Société, de 14881,20 fr à 9466,85 fr.

» *Dépenses.* — Les frais généraux d'exploitation ont sensiblement progressé; les augmentations sont les suivantes :

Personnel, environ.....	7000 fr
Machines, environ.....	4400 —
Produits.....	400 —
Déplacements.....	900 —
Gaz.....	1100 —
Entretien des bâtiments.....	1500 —
Recherches.....	1000 —

» Ces augmentations sont la conséquence très naturelle de l'augmentation sensible de l'activité du Laboratoire. Si l'on compare le chiffre des recettes pour essais (59501,95 fr) à celui des dépenses totales (83399,70 fr), on trouve un coefficient de 0,73 qui donne une idée du *rendement* d'exploitation du Laboratoire; et si l'on compare ce rendement de 73 pour 100 à ceux des laboratoires officiels d'essais, tant français qu'étrangers, on constate avec satisfaction que notre Laboratoire central d'Électricité se trouve dans les meilleures conditions.

» Cette situation avantageuse s'améliorerait certainement davan-

tage si, pour se tenir à hauteur des progrès scientifiques, le Laboratoire pouvait disposer de ressources plus importantes pour l'amélioration de son outillage. C'est avec regret que la Commission constate qu'une somme de 4354,20 fr seulement figure sur l'exercice 1910 pour l'acquisition d'instruments et matériel. Il est indispensable, en effet, pour assurer au Laboratoire un développement en rapport avec les services qu'il est appelé à rendre à la Science et aux Industries électriques, qu'il puisse disposer des appareils et machines les plus perfectionnés. Dans ce sens, quelques membres généreux de la Société ont fait connaître qu'ils étaient disposés à venir en aide au Laboratoire, soit par des dons de machines ou d'appareils, soit par des dons en espèces.

» La Commission, en signalant ces généreuses interventions particulières, exprime le vœu qu'elles se généralisent et que les membres de la Société, ayant à cœur de développer encore davantage la prospérité du Laboratoire, d'en faire à la fois le guide et l'auxiliaire indispensable des Industries électriques, participent, par tous les moyens en leur pouvoir, à une active propagande pour l'amélioration de son outillage.

» III. *École*. — L'avoir au 1^{er} janvier 1910 était de 278692,41 fr : il est passé au 31 décembre 1910 à 299945,09 fr, soit une augmentation de 21252,68 fr, correspondant à l'excédent de ses recettes (131145,83 fr) sur ses dépenses (109893,15 fr).

» Ces 21252,68 fr ont été employés de la façon suivante :

5271 fr ont été placés au fonds de réserve;

2953,75 fr ont été employés à l'acquisition du matériel;

13027,93 fr ont été placés aux fonds disponibles.

» La situation de l'École est donc des plus prospères.

» Elle continue à être très recherchée, grâce à la sévère et judicieuse proportion des diplômes qui sont décernés aux élèves méritants, et aussi parce qu'elle permet à chacun de trouver des débouchés pleins d'avenir dans les branches les plus variées de l'Industrie où l'Électricité est aujourd'hui indispensable.

» En résumé, les comptes de la Société en 1910 se groupent de la manière suivante :

PROFITS ET PERTES. — *Exercice 1910.*

	Recettes.	Dépenses.	Différence.
Services généraux....	46 791,71 fr	47 181,66 fr	— 389,95 fr
Laboratoire.....	78 399,70 —	74 045,50 —	+ 4 354,20 —
École.....	131 145,83 —	109 893,15 —	+ 21 252,68 —
	<u>256 337,24 —</u>	<u>231 120,31 —</u>	<u>+ 25 216,93 —</u>

» A l'avoir, les soldes nets comparatifs de 1909-1910 sont les suivants :

	1909.	1910.	Différence.
Services généraux....	169 409,45 fr	169 019,50 fr	— 389,95 fr
Laboratoire.....	410 773,42 —	415 127,62 —	+ 4 354,20 —
École.....	278 692,41 —	299 945,09 —	+ 21 252,68 —
	<u>858 875,28 —</u>	<u>884 092,21 —</u>	<u>+ 25 216,93 —</u>

» La Commission vous propose d'approuver les comptes qui ont été présentés, et d'exprimer, à notre excellent Trésorier et à ses dévoués collaborateurs, votre reconnaissance pour le zèle intelligent qu'ils apportent à la bonne gestion des finances de notre Société. »

Mis aux voix, le Rapport de la Commission des comptes est approuvé à l'unanimité.

RAPPORT DU COMITÉ D'ADMINISTRATION.

M. le SECRÉTAIRE GÉNÉRAL. — « Messieurs, je dois vous donner un aperçu de l'activité de notre Société en retraçant, devant vous, les principales étapes parcourues et en vous rappelant les travaux qui ont donné lieu, pendant le cours de cette année, à des communications intéressantes.

» L'année a débuté par une très remarquable conférence de notre président, M. Bochet, sur les Projecteurs électriques et leurs applications.

» Les communications d'un de nos anciens présidents, le Dr d'Arsonval, sur l'Électricité médicale et sur les accidents causés par l'électricité, ont obtenu également un vif succès.

» Nos connaissances théoriques et pratiques sur les machines électriques se sont enrichies par les communications de M. Marius Latour sur la commutation et par l'exposé, remarquablement fait par M. Guéry, des résultats de l'enquête à laquelle se sont livrées les première et quatrième Sections sur les conséquences qu'ont eu, pour le matériel électrique, les inondations de janvier 1910. Les conclusions auxquelles a conduit cette dernière étude ont le plus haut intérêt pour tous les électriciens : aussi le Bureau de la Société a-t-il jugé opportun d'en faire imprimer un tirage à part et de le faire distribuer.

» La très grande activité de la première Section s'est manifestée également par l'étude de faits se rattachant à la transmission et à la distribution de l'électricité. MM. Brunswick, Boucherot, Hillairet, Brylinski et Legouëz, nous ont apporté de précieux éclaircissements ou ont formulé d'intéressantes critiques sur les règlements relatifs aux distributions d'énergie électrique; M. Legouëz nous a fait connaître, dans une Communication remarquablement documentée, les résultats de l'enquête sur les accidents dus aux surtensions et aux courts-circuits dans les usines et les réseaux. On peut rattacher au même sujet l'étude de M. Giles sur les surtensions et les surintensités, et les communications de M. Armagnat et de M. Grosselin sur les essais des canalisations souterraines après pose, et sur le cahier des charges relatif aux câbles sous plomb à haute tension.

» Le *Bulletin* des vacances contient la publication d'un Mémoire de M. David, résumant une série d'essais très complets, effectués au Laboratoire sur différents modèles de câbles employés usuellement dans les canalisations électriques.

» M. Courtois a exposé les résultats de ses études sur les effets destructifs des décharges oscillantes de grande fréquence.

» En ce qui concerne les appareils de mesure et leurs applications, M. Joly nous a parlé du logomètre; M. Abraham nous a décrit ses intéressantes appareils et, notamment, son fréquence-mètre enregistreur; enfin, M. Hatfield nous a montré un nouveau compteur électrolytique que sa simplicité et son exactitude rendent pratique pour de petites installations.

» Dans le domaine des oscillations électriques, on peut signaler

la communication de M. Jégou sur les nouveaux détecteurs portatifs, et celle de M. Jouaust sur les propriétés magnétiques du fer aux fréquences élevées.

» Enfin, nos membres qui ont eu l'occasion d'excursionner en pays étranger nous ont rapporté d'utiles documents recueillis au cours de leurs voyages : M. Mongin nous a parlé des installations électriques de Rio de Janeiro, M. Laporte nous a fait un remarquable compte rendu de son voyage en Amérique, et notre président, M. Bochet, nous a décrit les très intéressantes installations que nous avons visitées au cours de l'excursion organisée par notre Société aux Mines de Lens et à l'Exposition de Bruxelles.

» Comme vous le voyez, Messieurs, l'année a été bien remplie, et la Société a su rester à la hauteur de son rang. Sa prospérité se manifeste par l'accroissement progressif de ses membres, qui sont maintenant au nombre de 1692. Malheureusement, nous avons eu à déplorer la mort de vingt-quatre de nos membres :

» MM. Bablon, Berger (G.), Blanc (J.), Cabral, Clamond (G.), Codry, Courjon (Dr), Debray (P.), Guyot, Helmer, Joly (Maurice), Noé, Paiva (A. de), Papillon (Dr), Pavie, Perrier, Picard (P.), Raoux, Rouart, Semnola, Siegfried, Tanner, Terrel et Vallance. »

COMPTE RENDU DES TRAVAUX DU LABORATOIRE CENTRAL ET DE L'ÉCOLE SUPÉRIEURE D'ÉLECTRICITÉ.

M. P. JANET. — « Messieurs, j'ai l'honneur de présenter à l'Assemblée générale de notre Société mon Rapport annuel sur le fonctionnement des services du Laboratoire central et de l'École supérieure d'Électricité pendant l'année 1910.

I. — Laboratoire central d'Électricité.

» 1^o *Matériel*. — Le Laboratoire a continué, en 1910, à enrichir, dans la limite toujours trop faible des crédits disponibles, sa collection d'instruments de mesure : nous citerons en particulier deux wattmètres, l'un de 6 watts sous 120 volts, pour l'étude de la puissance consommée dans le fil fin des compteurs, et l'autre

de 0,5-1 ampère; deux transformateurs d'intensité (5, 10, 20, 25, 50, 100 ampères); un voltmètre de précision à 6 sensibilités (3, 15, 75, 150, 300, 750 volts); deux ampèremètres électromagnétiques (0,2, 0,5, 1 ampère), etc. Signalons d'autre part un petit groupe à courant continu pouvant donner 1000 volts et 0,3 ampère pour l'étalonnage des voltmètres et des compteurs.

» Enfin, le Laboratoire a construit et monté un nouveau banc photométrique, et une batterie spéciale de 130 éléments de 100 ampères-heure a été installée pour la nouvelle catégorie d'essais photométriques dont il sera question plus loin.

» 2° *Installations nouvelles.* — Pour cette même catégorie d'essais (essais effectués pour le compte de l'Association des consommateurs de lampes à incandescence), nous avons dû construire de nouveaux locaux. Nous avons utilisé pour cela un des rares espaces disponibles qui nous restent dans l'annexe du Laboratoire (anciennes ambulances urbaines de la ville de Paris). Nous avons pu ainsi couvrir, à l'aide d'une construction légère en briques, une surface de 60 m² environ. Une nécessité urgente seule a pu nous forcer à continuer le système des agrandissements par petites fractions et au moyen de constructions ayant nécessairement un caractère provisoire; ces solutions partielles sont certainement très coûteuses, et il est plus que jamais nécessaire de prévoir, comme nous le faisons déjà dans notre Rapport de l'an dernier, une large extension de nos locaux.

» Le nouveau bâtiment, qui se raccorde aux parties anciennes, comprend : 1° un magasin; 2° une salle d'accumulateurs; 3° une salle de réception et d'emballage pour les lampes à incandescence; 4° une salle de photométrie.

» 3° *Essais.* — Les essais effectués au Laboratoire en 1910 ont atteint le nombre de 1187 contre 1114 en 1909, et 1132 en 1908. Les recettes se sont élevées à 59 501,95 fr contre 48 642,40 fr en 1909 et 49 765,15 fr en 1908. L'augmentation de 10 000 fr environ obtenue sur l'exercice 1909 tient pour la plus grande partie aux essais qui ont été effectués; conformément au décret du 3 juin 1909, sur les types de compteurs destinés aux distributions publiques d'énergie électrique et soumis à l'approbation du Minis-

tère des Travaux publics, et en partie à l'augmentation du nombre des essais de machines.

» Les essais effectués par le Laboratoire se répartissent ainsi :

Compteurs.....	458
Lampes à incandescence.....	195 ⁽¹⁾
Machines et transformateurs.....	102
Ampèremètres.....	92
Piles.....	74
Voltmètres.....	70
Résistivités, Résistances.....	36
Haute tension.....	31
Isollements, isolants.....	18
Lampes à arc.....	17
Wattmètres.....	16
Accumulateurs.....	10
Oscillogrammes.....	9
Fers, tôles.....	8
Paratonnerres.....	5
Vérification d'installation.....	3
Étalons photométriques.....	2
Étalon de précision (résistance).....	1
Essais divers.....	40
	1187

» Dans ces essais ne figure pas le service de vérifications périodiques des compteurs et des installations électriques de la Chambre des Députés, que le Laboratoire exécute depuis 1898 par abonnement à forfait. Les mesures d'isolement de ces installations ont été, en 1910, particulièrement nombreuses, à la suite des inondations du mois de janvier.

» Au contraire, dans la statistique précédente figurent les essais de lampes à incandescence destinées à la flotte, que nous exécutons régulièrement depuis 1904 pour le Ministère de la Marine.

» Nous signalerons, comme particulièrement intéressants, les essais suivants :

» En premier lieu, la continuation des essais d'accumulateurs pour sous-marins exécutés pour le Ministère de la Marine. Quatre éléments ont été essayés en 1910, du 14 mai au 17 septembre; ils ont été soumis au maximum à 210 décharges, dont 184 d'endurance et 26 de capacité.

(¹) Portant sur 404 lampes et 654 mesures photométriques.

» Le Ministère de la Marine nous a également chargés de l'étude d'un certain nombre de substances isolantes destinées à l'appareillage électrique des navires de guerre : nous avons dû analyser les diverses circonstances (chaleur, humidité, etc.) capables d'influencer sur les propriétés de ces substances.

» Le Ministère de la Guerre (Administration des Poudres et Salpêtres) a continué à nous confier la réception de ses installations électriques : les essais ont porté, en 1910, sur 97 moteurs en général triphasés, d'une puissance moyenne de 100 kilowatts, et sur un groupe turbo-alternateur de 1000 kilovolts-ampères.

» Le même Ministère (Dépôt central de Télégraphie militaire) nous a confié l'étude complète d'une bobine de self-induction à noyau de fer.

» Le Ministère des Travaux publics (Administration des Télégraphes) a demandé au Laboratoire de procéder aux essais de piles présentées au concours pour l'adjudication.

» Des essais analogues nous ont été confiés par le Ministère des Colonies; pour ce même Ministère, nous avons procédé à l'étude des propriétés d'une nouvelle substance, analogue à la gutta-percha, recueillie à Madagascar.

» Parmi les essais qui nous ont été confiés par des administrations privées ou par des particuliers, nous citerons, en premier lieu, des essais oscillographiques très complets que nous avons exécutés sur un réseau du centre de la France pour l'étude des phénomènes variables (surtensions et surintensités), qui se produisent à la manœuvre des interrupteurs. Un heureux hasard nous a permis d'enregistrer les phénomènes qui se produisent au moment du percement d'un câble. Ce travail, dont l'importance est égale à celui que M. David a exécuté il y a quelques années sur le littoral méditerranéen, pourra, nous l'espérons, être publié dans notre *Bulletin*, dès que nous aurons reçu les autorisations nécessaires. En outre, nous avons fait, dans des ateliers de construction, un certain nombre d'études oscillographiques sur des alternateurs avec détermination d'harmoniques dans des conditions variées.

» Parmi les essais divers, nous citerons des essais de lampes à incandescence à filaments métalliques qui ont duré en moyenne

3000 heures, et au maximum 9000; des essais de toiles isolantes recouvertes de vernis divers et soumis à diverses circonstances extérieures; l'étude d'une lampe à vapeur de mercure dans le quartz; des épreuves d'isolateurs jusqu'à 100 000 volts à sec et sous la pluie artificielle.

» Deux nouveaux services d'essais ont été organisés au Laboratoire en 1910 : la vérification des compteurs soumis à l'approbation du Comité d'Électricité pour les distributions publiques d'Énergie électrique, et les essais de lampes pour l'Association des consommateurs de lampes à incandescence.

» Le premier nous a amenés à faire l'étude complète de 33 compteurs, dont 16 à courant continu et 17 à courants alternatifs. Cette étude comprend essentiellement l'étalonnage à diverses charges, l'influence de l'obliquité, du champ terrestre, des surcharges, de la fréquence, du déphasage, des courts-circuits; à ce dernier point de vue, nous avons été amenés à faire un examen oscillographique des différents phénomènes qui se produisent suivant la manière dont a lieu le court-circuit.

» Le second a pris naissance dans les circonstances suivantes : en 1910 s'est formée une Association qui permet à chacun de ses adhérents, tout en conservant le libre choix de ses fournisseurs, d'obtenir, moyennant une très légère majoration du prix de la lampe, des lampes satisfaisant à un cahier des charges soigneusement étudié et garantissant une qualité uniforme et bien connue, soit comme intensité lumineuse, soit comme consommation, soit comme durée. L'Association s'est adressée au Laboratoire pour exécuter les essais prévus au cahier des charges; ce nouveau service, pour lequel nous avons constitué une installation et un personnel spécial, a commencé à fonctionner le 1^{er} novembre 1910 : nous avons déjà essayé, jusqu'au 31 décembre dernier, dans ces conditions, 6772 lampes au carbone et 312 lampes à filament métallique, ce qui correspond à l'achat, par l'Association, de 36824 lampes au carbone, 7080 lampes au tungstène et 1600 lampes Tantale. Ce service est évidemment destiné à prendre une extension rapide.

» 4^o *Travaux et recherches.* — Les travaux les plus importants

effectués au Laboratoire en 1910 ont porté, comme les années précédentes, sur les Unités électriques. Nous rappellerons, à ce sujet, les communications faites à la Société par MM. Laporte et de la Gorce sur l'équivalent électrochimique de l'argent, et par M. Jouaust sur les étalons de résistance et de force électromotrice. Mais l'événement le plus intéressant de l'année a été la délégation, à Washington, de notre sous-directeur, M. Laporte, qui a collaboré avec MM. Rosa, Wolff, Jäger et Smith aux expériences internationales, entreprises au Bureau of Standards sur l'équivalent électrochimique de l'argent et l'élément étalon au cadmium. Les résultats de ces recherches ne pourront être publiés que lorsqu'ils auront reçu l'approbation du Comité scientifique international des Unités électriques qui en avait pris l'initiative. M. Laporte a résumé ici même ses impressions de voyage et rappelé avec quelle courtoisie il avait été accueilli aux Etats-Unis.

» Depuis le retour de M. Laporte, le Laboratoire a exécuté quelques mesures, suite naturelle du travail de Washington : c'est ainsi que nous avons comparé deux étalons de résistance de manganin appartenant au Bureau of Standards et qui avaient déjà été comparés à Londres et à Berlin; nous avons également continué l'étude d'étalons de résistances de manganin construits par la maison Carpentier et par la maison Otto Wolff : nous constituons ainsi, peu à peu, une base solide pour la conservation de l'ohm au Laboratoire, sous forme d'étalon du fil métallique. Toutes ces comparaisons ont été faites au moyen d'un pont d'un nouveau modèle construit au Laboratoire et combiné par M. R. Jouaust.

» Nous avons continué également la construction régulière de piles étalon Weston (40 environ dans l'année) et nous avons pu en communiquer des exemplaires à plusieurs laboratoires de Physique.

» Parmi les recherches non encore publiées ou non susceptibles de l'être, nous citerons encore : des recherches sur les divers procédés de mesure des grandeurs magnétiques, entreprises d'accord avec le Bureau of Standards avec lequel nous avons échangé des éprouvettes d'acier ou de tôles; des études sur les pertes dans le diélectrique des condensateurs, le perfectionnement de certaines me-

sures en courant alternatif (self-induction et capacité) au moyen du galvanomètre à résonance : cet appareil a été construit au Laboratoire et se prête à un certain nombre de mesures intéressantes, comme l'augmentation de résistance des rails en courant alternatif. Enfin, M. Jouaust a étudié l'aimantation du fer aux fréquences élevées : cette étude a donné lieu à une Note à l'Académie des Sciences et à une Communication à la Société.

» Enfin, nous avons correspondu, à propos du choix d'un cuivre étalon, avec le Bureau of Standards à qui nous avons communiqué le résultat de nombreuses mesures de résistivité faites au Laboratoire depuis sa fondation.

» On voit que les travaux de recherches constituent une part importante de l'activité du Laboratoire : à ce point de vue, il est utile de remarquer que, dans les comptes de l'exercice financier, une partie notable du Chapitre, *Personnel*, doit être considérée comme affectée à ces recherches.

» *Publication des travaux du Laboratoire.* — Le premier Volume des travaux du Laboratoire, qui comprend 500 pages environ, a paru dans le courant de 1910 ⁽¹⁾. Il comprend toutes les recherches effectuées au Laboratoire depuis sa fondation jusqu'en 1905. Un second Volume (1905-1910) est actuellement sous presse et paraîtra incessamment.

II. — École.

» 1^o *Matériel.* — Le matériel de l'École s'est enrichi en 1910 de deux moteurs à courant continu de 2 kilowatts à 1700 t : m et d'un certain nombre d'instruments de mesure parmi lesquels nous citerons un fréquencemètre, un wattmètre (12,5; 25 ampères), un ampèremètre et un voltmètre électromagnétique, une pile étalon Weston, deux compteurs Aron, etc.

2^o *Enseignement.* — L'enseignement s'est donné en 1909-1910 suivant le programme habituel; signalons cependant deux con-

(¹) Nous rappellerons que cet Ouvrage est mis en vente à la librairie Gauthier-Villars au prix de 15 fr; par suite d'une entente avec l'éditeur, il est cédé aux Membres de la Société internationale des Électriciens, de la Société de Physique, de la Société des Ingénieurs civils et aux officiers des Armées de Terre et de Mer, au prix réduit de 10 fr. S'adresser à M. Tessier, agent administratif de la Société, 14, rue de Staël.

férences sur le radium et la radioactivité qu'a bien voulu faire à nos élèves M. Debiegne, chef des travaux du laboratoire de Mme Curie.

» 3^o *Voyage d'études*. — Le voyage d'études s'est effectué comme chaque année à l'époque des vacances de Pâques, sous la direction de M. Chaumat; cinquante élèves environ y ont pris part, et M. Mazen nous a fait le plaisir d'accompagner la caravane pendant une partie du trajet. Comme l'année précédente, M. Bochet avait bien voulu mettre une bourse à notre disposition pour permettre le voyage à l'un de nos élèves peu fortunés, et le Ministère du Commerce nous a accordé quatre autres bourses dans le même but.

» *Promotion XVI* (1909-1910). — Il a été délivré, à la fin de juillet dernier, 89 diplômes se répartissant ainsi :

Licenciés ès sciences.....	16
Élèves étrangers diplômés d'Écoles techniques supérieures.....	12
Officiers de Marine.....	10
Anciens élèves médaillés des Écoles nationales d'Arts et Métiers..	6
Officiers délégués par le Ministre de la Guerre.....	4
Ingénieurs des Arts et Manufactures.....	2
Ancien élève de l'École Polytechnique.....	1
Ingénieur civil des Mines.....	1
Élèves reçus au concours.....	37
	89

» 4^o *Promotion XVII* (1910-1911). — La promotion actuellement en cours d'études comprend 111 élèves et a la composition suivante :

Licenciés ès sciences.....	17
Anciens Élèves médaillés et diplômés des Écoles nationales d'Arts et Métiers.....	13
Élèves étrangers diplômés d'Écoles techniques supérieures.....	13
Officiers et Ingénieurs délégués par les Ministères.....	11
Officiers de Marine.....	9
Ingénieurs des Arts et Manufactures.....	3
Ingénieurs des Constructions civiles.....	2
Ancien élève de l'École Polytechnique.....	1
Ingénieur agronome.....	1
Élèves reçus au concours.....	41
	111

» A ces élèves réguliers il convient d'ajouter 13 auditeurs libres suivant en tout ou en partie notre enseignement.

» Comme chaque année, l'École du Génie maritime a fait effectuer par ses élèves, dans nos laboratoires, un certain nombre de mesures et essais électriques.

» 5^o *Anciens élèves.* — Le nombre total des anciens élèves ayant passé par l'École supérieure d'Électricité depuis sa fondation est de 1125, sur lesquels 970 ont obtenu le diplôme. Autant que nous pouvons en juger, les situations occupées actuellement par ces derniers se répartissent ainsi :

Situations occupées par les anciens élèves diplômés au 1^{er} avril 1911.

Ateliers et maisons de construction.....	284
Armée, Marine, Télégraphes.....	127
Stations centrales.....	89
Enseignement et Laboratoires.....	59
Chemins de fer.....	58
Ingénieurs-Conseils.....	35
Électrochimie et Électrométallurgie.....	28
Travaux publics.....	27
Tramways.....	25
Mines.....	21
Automobilisme.....	16
Divers.....	56
Situations inconnues.....	127
Décédés.....	21
Total.....	973

» 6^o *Société amicale des anciens élèves.* — La Société amicale compte aujourd'hui 493 membres. Ses deux principales sources d'activité sont : d'une part, le service de placement, d'autre part la publication de son *Bulletin*. On peut juger du développement du service de placement par le fait que l'Association a reçu, en 1910, 80 offres de situation. M. Chassériaud, directeur de la *Lumière électrique* et ancien élève de l'École, a eu l'obligeance de faire profiter les camarades de la large publicité de son journal pour faire connaître rapidement aux intéressés les offres qui arrivent à l'Association. Quant au *Bulletin*, sous l'impulsion d'un Comité de rédaction jeune et actif, il s'est complètement transformé

et possède maintenant tous les éléments nécessaires pour former un recueil de plus en plus intéressant.

» Tel est, Messieurs, le tableau résumé de la vie et de l'activité du Laboratoire et de l'École pendant l'année 1910 : la situation qui résulte des chiffres et des détails donnés plus haut est évidemment très prospère; mais il faut l'examiner non au point de vue du présent, mais au point de vue de l'avenir : or, il ne peut échapper à personne que nous sommes aujourd'hui à une époque décisive pour les deux belles institutions de la Société; il faut prévoir, dans un avenir très prochain, des développements considérables comme matériel et comme locaux : des capitaux importants sont nécessaires pour cela, et nous avons le ferme espoir que la Société, qui a fondé ces établissements, saura trouver les moyens de leur donner la puissance à laquelle leur donnent droit les preuves de vitalité qu'ils ont montrées jusqu'ici. »

M. le PRÉSIDENT remercie MM. Cellierier, de Valbreuze et P. Janet; puis il invite les Sociétaires qui n'ont pas encore voté à venir déposer leur bulletin et, à cet effet, déclare la séance suspendue pendant 10 minutes.

Trois bureaux de scrutin sont constitués.

A la reprise de la séance et pendant que s'effectue le dépouillement des votes, il est donné suite à l'Ordre du jour qui appelle les Communications techniques.

SITUATION FINANCIÈRE.

COMPTES DE L'EXERCICE 1910.

CRÉDIT. DÉBIT.
I. — *Services généraux.*

	fr		fr
Cotisations libérées.....	2500,00	Bulletin.....	21399,86
Cotisations de l'exercice.....	30320,00	Frais d'administration.....	2429,20
Intérêts.....	2079,01	Personnel.....	9720,00
Produits du Bulletin.....	8446,10	Frais de correspondance.....	914,60
Profits et pertes.....	34,70	Frais de réunions.....	1215,15
Dons avec affectations spéciales ..	2136,35	Subvention au Laboratoire....	9466,85
Dons d'Ouvrages divers.....	475,00	Commission électrotechnique.	1400,00
Participation de l'Ecole à la Subven-		Cotisations irrécouvrables....	636,00
tion du Laboratoire.....	1500,00	Bibliothèque.....	863,80
Intérêts du legs Hughes.....	1500,00	Placement au fonds social.....	2500,00
» Cheux.....	1222,00	Bourse Hughes.....	1835,15
Prélèvements sur fonds disponibles.	3768,70	Fondation Cheux.....	1125,85
		Amortissement :	
		Bibliothèque.....	475,00
			53981,86

II. — *Laboratoire.*

Arrérages de la rente.....	fr 7903,00	Frais d'opérations et essais taxés :	
Redevances pour essais et étalonne- ments.....	50501,95	Machine à vapeur, moteurs à gaz et électrique.....	8219,50
Redevances des élèves et tiers...	1221,95	Produits.....	2474,00
Subvention de la Société.....	9466,85	Atelier.....	484,70
Profits et pertes.....	305,95	Déplacement du personnel..	4901,45
Amortissement :		Personnel.....	16079,65
Ministère du Commerce.....	5000,00	Frais d'administration :	42421,95
		Frais de bureau, correspon- dance et divers.....	1849,30
		Coke.....	1060,90
		Gaz.....	3374,55
		Eau, électricité.....	1029,90
		Telephone.....	359,10
			2651,05

Entretien des bâtiments.....	9 511, 00
Entretien des machines et appareils.....	2605, 25
Recherches sur les unités électriques :	
Frais de voyage de M. Laporte.....	1225, 45
Produits divers.....	686, 45
Acquisition d'instruments et de matériel.....	4354, 20
Amortissement :	
Constructions.....	5000, 00
	83399, 70

III. — École.

Redevances des élèves et auditeurs.....	117039, 50
Souscriptions.....	10250, 00
Intérêts.....	1846, 33
Profits et pertes.....	10, 00
Subvention de la Ville de Paris.....	2000, 00
Dons en nature.....	180, 00
	131325, 83

Personnel.....	51678, 60
Travaux des élèves :	
Machine à vapeur, moteurs à gaz et électrique.....	4024, 05
Produits.....	1397, 70
Atelier.....	3053, 85
Conférences, projets, examens, etc.....	29213, 70
Fournitures diverses.....	4479, 20
Frais d'administration :	
Frais de bureau, correspondance et divers.....	2488, 90
Chauffage et éclairage.....	2735, 20
Entretien des bâtiments.....	5224, 10
Entretien des machines et appareils.....	3258, 65
Impôts, assurances.....	3386, 65
Participation à la subvention du Laboratoire.....	2676, 65
Acquisition d'instruments et de matériel.....	1500, 00
Placement au fonds de réserve.....	2953, 75
Amortissement :	
Instruments et matériel.....	5271, 00
	180, 00
Solde créditeur.....	13027, 93

131325, 83
268707, 39

268707, 39

BILAN AU 31 DÉCEMBRE 1910.

PASSIF.

I. — Services généraux.

ACTIF.			
Fonds social (valeur au 31 décembre 1910) :			
50 obl. P.-L.-M. 3 %/o.....	fr 21475,00	Cotisations anticipées.....	fr 435,00
9 obl. Est 3 %/o.....	3861,00	Frais de publication.....	233,61
4 obl. Ouest-Algérien 3 %/o..	1708,00	Créditeurs divers.....	1446,80
603 ^{re} de rente 3 %/o.....	19547,25	Monument Maseart.....	3991,00
Espèces.....	47,78	Bourse Hughes.....	199,45
Legs Hughes (valeur au 31 décembre 1910) :	46639,03	Fondation Cheux.....	2078,50
1500 ^{re} de rente 3 %/o.....	48625,00	Commission électrotechnique.....	1400,00
Legs Cheux (valeur au 31 décembre 1910) :		Dons avec affectations spéciales.....	224,45
1222 ^{re} de rente 3 %/o.....	39613,15		fr 10008,81
Fonds disponibles (valeur au 31 décembre 1910) :			
36 ^{re} de rente 3 %/o.....	1167,00		
20 obl. Nord 3 %/o.....	8775,00		
Caisse et banquier.....	9942,00		
Cotisations à toucher.....	6533,88		
Débiteurs divers.....	1890,00		
Bibliothèque.....	260,55		
Mobilier.....	19792,70		
Compte d'ordre.....	1900,00		
	1832,00		
	179028,31		

Bibliothèque.....	fr	2975,40	Ministère du Commerce...	fr	15000,00
Constructions.....		217976,83	Créditeurs divers.....		8831,70
Instruments et matériel.....		209175,39			23831,70
Caisse.....		2473,65			
Débiteurs divers.....		5718,05			
Cautionnement.....	fr	640,00			
		438959,32			

III. — École.

Instruments et matériel.....	fr	171618,10	Amortissement de l'em-	fr	
Constructions.....		63436,20	prunt.....		599,16
Fonds de réserve (valeur au			Créditeurs divers.....		3461,40
31 décembre 1910) :	fr		Redevances des élèves		
625 ^{fr} de rente 3 %.....		20260,40	pour 1911.....		32075,00
34 obl. Orléans 3 %.....		14807,00			36135,56
12 obl. Nord 3 %.....		5265,00			69976,07
Fonds disponibles (valeur au					
31 décembre 1910) :					
158 ^{fr} de rente 3 %.....		5121,85			
58 obl. Nord 3 %.....		25507,50			
16 obl. Orléans 3 %.....		6968,00			
Caisse et banquier.....		37597,35			
Débiteurs divers.....		15549,95			
Cautionnement.....		5335,00			
Compte d'ordre.....		143,35			
		2068,30			
	fr	336080,65			
		954068,28			
			AVOIR net au 31 décembre 1910 :		
			Services généraux.....	fr	169019,50
			Laboratoire.....		415127,62
			École.....		299945,09
					884092,21
					974068,28

NOUVELLE LAMPE A ARC EN VASE CLOS AVEC CHARBONS MINÉRALISÉS.

M. ALIAMET ⁽¹⁾. — « Messieurs, en vous entretenant ce soir de la lampe Bardon à arc en vase clos avec charbons minéralisés, je désire me borner à la simple présentation d'un nouveau mode d'éclairage par arc appelé, je crois, à un grand succès.

» A la séance de mars 1907, M. Dobkévitch vous exposait les remarquables travaux de M. Blondel sur l'arc avec charbons minéralisés.

» Vous savez que les recherches de notre éminent collègue se sont pratiquement traduites par la création de charbons minéralisés appelés *dizones*, et par celle de la lampe à arc dite *Carbo Minéral*, destinée à les utiliser.

» Depuis, les applications de l'éclairage par arc, avec charbons minéralisés, se sont considérablement développées.

» A puissance égale dépensée dans un arc, celui à électrodes minéralisés peut donner cinq fois plus de lumière que l'arc avec charbons purs.

» Le taux de la minéralisation doit atteindre pour cela près de 50 pour 100.

» En réalité, pour éviter pratiquement les effets nuisibles des scories, on a dû réduire notablement ce taux. Le coefficient 5 s'est, par suite, trouvé ramené à 3 environ.

» Quoi qu'il en soit de ce rendement lumineux encore très élevé, il faut convenir que les charbons minéralisés sont plus coûteux que les charbons purs et que leur usure, par combustion, est à peu près deux fois plus rapide. Les frais de matière et de main-d'œuvre pour le renouvellement des charbons sont donc augmentés. On ne peut mieux réduire ces frais qu'en diminuant l'usure des charbons.

» Dès 1904, M. A. Blondel suggérait, à cet effet, l'idée d'appli-

⁽¹⁾ M. Aliamet ayant été empêché au dernier moment, cette Communication a été lue en séance par M. Guillez, membre de la Société.

quer aux charbons minéralisés le si fertile principe de la combustion en vase clos.

» De nombreux essais ont été entrepris dans cette voie. La principale difficulté à surmonter a été de se débarrasser des volumineux dépôts qui tapissent rapidement le globe entourant l'arc et le rendent peu à peu opaque.

» Ces dépôts, soit dit en passant, sont presque uniquement formés de fluorure de calcium, en poudre impalpable, produit qui constitue l'élément essentiel de la minéralisation des charbons.

» Ce fluorure ne se dissocie pas comme on le pensait jadis; il se sublime tout simplement; l'inévitable dépôt ne saurait donc être absorbé ou dissous par des matières placées dans ce but à l'intérieur du globe, ainsi qu'il a été vainement essayé par quelques-uns.

» Parmi les chercheurs qui ont tenté et peut-être réussi à empêcher les globes vase clos de devenir opaques, je pense que celui qui a le plus simplement et le plus efficacement atteint ce but est M. Carbone, ingénieur italien.

» Il a résolu le problème par la création du globe de forme toute particulière que vous voyez ici et dont le dessin montre la coupe K (*fig. 1*).

» Vous remarquez que ce globe est divisé en deux compartiments, séparés par une partie étranglée.

» C'est dans le compartiment supérieur que se produit l'arc, la température s'y maintient élevée. Au contraire, la paroi du compartiment inférieur reste à une température relativement basse et les fumées de fluorure vont former, en toute tranquillité, un abondant dépôt, dans ce condenseur.

» En fait, l'étranglement sépare nettement la partie opaque du globe de la partie utile, qui reste transparente.

» Le globe que vous voyez ici montre très bien cette particularité de fonctionnement. Il a été retiré d'une lampe après 500 heures de marche.

» Les figures 2 et 3 montrent l'aspect du globe uniformément clair au début de l'allumage, et l'aspect opaque du condenseur après une vingtaine d'heures de fonctionnement.

» Le globe condenseur étant réalisé, une déception attendait

cependant M. Carbone; aucun des charbons minéralisés du commerce ne donnait un arc stable et celui-ci s'éteignait fréquemment. Après de longues recherches, M. Carbone est arrivé à fabriquer des charbons minéralisés fonctionnant parfaitement. Ces charbons

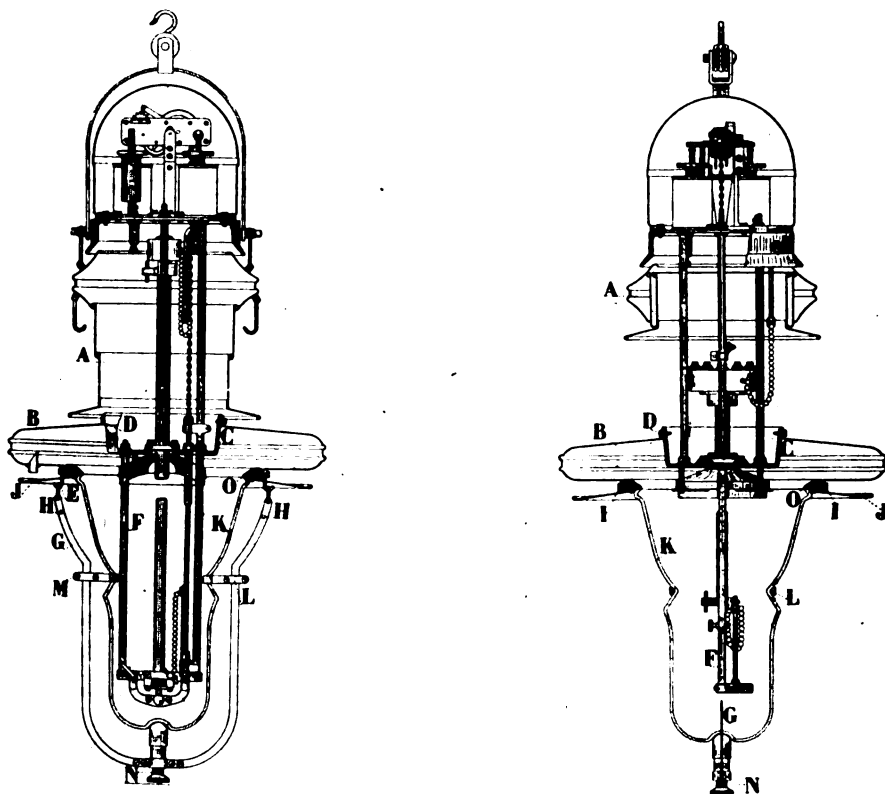


Fig. 1.

sont formés d'une pâte *homogène* minéralisée dans la masse à l'encontre de ce qui se pratique pour les charbons de cette nature destinés aux arcs minéralisés ordinaires.

» Voici deux échantillons de ces nouveaux charbons, ils ne fonctionneraient pas dans des lampes à arc à air libre; il se produirait un excès de scories prohibitif.

» En examinant ces charbons, remarquez leur taille particulière; pour l'un, elle est celle des charbons ordinaires ayant brûlé en vase clos. Pour l'autre, la taille s'est produite en sifflet. Je reviendrai tout à l'heure sur cette dernière taille défavorable.

» Il restait enfin à établir un type de lampe convenable pour

réussir définitivement à résoudre le problème de l'arc minéralisé brûlant en vase clos.

» M. Carbone construisit une lampe répondant à ces desiderata, mais elle présentait quelques imperfections qui ne se rencontrent plus dans la lampe Bardon. En particulier, dans les débuts, on ne parvenait pas à obtenir assez de stabilité pour faire usage



Fig. 2.

de courant continu. Cette restriction provenait probablement d'un manque de mise au point dans la fabrication des charbons, puisqu'elle a disparu plus tard.

» J'en arrive maintenant à l'examen de la lampe Bardon. En voici deux aspects d'ensemble; l'un montre la lampe vue de face, l'autre étant de profil; l'habillage est relevé (*fig. 1*).

» Le globe condenseur K est appliqué contre une couronne métallique O soigneusement dressée. Il est maintenu en position par la pression d'un bouton poussoir à ressort N, fixé à la partie inférieure d'une chappe G, articulée en M et d'une très faible épaisseur radiale, afin d'éviter l'ombre portée. Ce dispositif, complété

par un collier ML, permet d'enlever très facilement le globe K.

» La couronne O est surmontée d'une chambre annulaire B, très plate, dans laquelle les fumées les plus légères, qui ne se sont pas rendues au condenseur, viennent se déposer. Pour ne pas troubler cette dernière condensation, un écran [en terre réfractaire est disposé un peu au-dessus du point où jaillit l'arc. Cet écran



Fig 3.

évite l'échauffement de la chambre B, par suite du rayonnement.

» Le charbon supérieur traverse l'écran réfractaire avec un jeu minimum, de manière à empêcher à peu près toute rentrée d'air.

» La cuvette métallique DC ferme le vase clos, constitué par l'ensemble du globe K et de la chambre plate B. Cette cuvette sert, en outre, à supporter les tiges F du porte-charbon inférieur; elle est rigidement suspendue à la platine supérieure portant le mécanisme. Dans l'intervalle se trouve l'enveloppe, étanche aux intempéries; elle est figurée en A et forme un habillage dit *télescopique*, que des crochets permettent de maintenir relevé lorsqu'on change les charbons.

» Tout l'ensemble, parfaitement abrité, est suspendu par un crochet isolant; vous voyez en J le réflecteur habituel en tôle émaillée.

» *Mécanisme.* — Le mécanisme se compose d'un rouage dont la cage peut basculer autour de son centre, grâce à une suspension par couteaux. La cage s'incline d'un côté ou de l'autre, ou bien reste immobile, suivant le sens de l'attraction résultante exercée par deux bobines, série et dérivée, agissant sur deux noyaux de fer, librement suspendus aux extrémités de la cage.

» Un système de roue de renvoi et chaînettes réunit les tiges porte-charbons au système oscillant.

» Lorsque l'enroulement dérivé prédomine, la cage s'incline vers la gauche. La roue d'échappement se dégage alors d'une butée fixe et les charbons se rapprochent jusqu'au contact, le porte-charbon supérieur étant convenablement lesté dans ce but.

» La prédominance de l'enroulement série fait, au contraire, basculer le rouage, vers la droite, la butée fixe empêche l'échappement, et les charbons s'écartent ce qui permet à l'arc de s'amorcer.

» Le recul disponible, lors de l'écart, peut atteindre 25 mm; cette grande longueur est quelquefois nécessaire.

» Enfin, pour une certaine position de la cage qui correspond à des efforts magnétiques presque égaux, la roue d'échappement se dégage lentement et défile dent par dent, c'est la position de réglage.

» Dans les lampes à charbons minéralisés, l'écart doit toujours se produire avec une certaine lenteur, afin d'éviter que l'arc amorcé ne s'éteigne aussitôt, par suite d'un accroissement de longueur trop rapide ayant pour effet d'empêcher l'échauffement nécessaire.

» Le rapprochement ne doit subir, au contraire, aucune gêne.

» Pour satisfaire à ces conditions, M. Bardon a appliqué à sa nouvelle lampe le dispositif d'amortisseur à simple effet, employé déjà par lui dans ses lampes différentielles.

» Le piston à air de la pompe y est muni d'une ouverture de rentrée d'air fermée par un clapet à bille.

» L'amortisseur est, bien entendu, solidaire de la cage oscillante. Grâce à ce dispositif, le rapprochement des charbons n'est pas gêné, tandis que la viscosité mécanique du système est d'autant plus grande que l'écart des charbons tend à se produire plus brusquement.

» Quelques mots maintenant sur l'arc minéralisé lui-même. Lors du fonctionnement, on n'observe pas de cratère sur les charbons, même dans le cas du courant continu.

» L'arc jaillit, s'échappant de certains points privilégiés, fréquemment changeants.

» En outre, il est excessivement sensible au soufflage, que celui-ci soit provoqué par un courant d'air ou par une action magnétique.

» Dans les lampes d'essai, on avait remarqué la taille en sifflet, dont je vous ai parlé tout à l'heure. Elle avait le plus fâcheux effet sur le fonctionnement. On reconnut que cette taille défavorable était due à un soufflage magnétique provoqué par les tiges mêmes du porte-charbon inférieur. Le courant se partageait inégalement entre les deux tiges et il subsistait une très légère action magnétique résiduelle, suffisante pour amener la taille en sifflet, après quelque temps de marche.

» Voici le procédé ingénieux qui a permis d'égaler rigoureusement les effets perturbateurs. Les tiges du porte-charbon inférieur sont isolées de la cuvette DC et réunies à leur partie supérieure par une traverse en maillechort.

» Le courant est amené en un point déterminé de la traverse, et, par un choix convenable de ce point, les courants dans les tiges F peuvent avoir leur action magnétique sur l'arc exactement équilibrée.

» Ce réglage s'effectue une fois pour toutes, expérimentalement d'ailleurs et lors des essais, avant la livraison des lampes.

» Telle que je viens de vous la décrire, la lampe ne pouvait encore fonctionner que sur courant alternatif.

» En courant continu, l'arc persistait à être par trop instable.

» Une constante amélioration dans la fabrication des charbons spéciaux à cette lampe en vase clos et l'artifice dont il me reste à vous dire un mot ont permis d'arriver, en continu, à un fonctionnement aussi parfait qu'en alternatif.

» Cet artifice, indispensable jusqu'ici, consiste à munir la partie inférieure de la chambre plate B d'un petit évent visible à gauche du dessin. Cet évent peut être obturé plus ou moins par une cheville convenablement percée.

» Il se produit dès lors, dans le vase clos, une lente circulation gazeuse, accompagnée d'une très minime rentrée d'air. C'est par ce simple moyen que fut acquise la stabilité de marche en continu. Une rentrée d'air trop grande conduirait, sans avantage nouveau, à une réduction exagérée de la durée des charbons et c'est pourquoi on fait usage de la cheville de réglage.

» Des essais récents ont montré l'influence considérable de la qualité des charbons sur la stabilité de l'arc. Encore quelques améliorations de ce côté et le dispositif d'évent pourra vraisemblablement être supprimé. Cette suppression aura pour effet de rendre égales les usures des charbons en continu et en alternatif.

» Dans la pratique, toutes choses égales d'ailleurs, la lampe en vase clos que vous voyez ici fonctionne sans renouvellement de charbons pendant 120 heures en alternatif, et pendant 95 heures en continu.

» Les améliorations constantes, apportées à la fabrication des charbons de M. Carbone, permettent d'escompter d'ici peu une augmentation de 20 pour 100 sur ces durées, en dehors de leur égalisation.

» Avec ces durées de marche et malgré le prix relativement élevé des charbons minéralisés spéciaux pour cette lampe en vase clos, la dépense totale pour les deux charbons est à très peu près d'un centime et demi par heure.

» Au point de vue du rendement lumineux, l'arc à charbons minéralisés brûlant en vase clos est presque égal à l'arc à charbons minéralisés brûlant à l'air libre, comme c'est le cas pour les lampes usitées jusqu'ici. Théoriquement, le rendement lumineux de l'arc en vase clos est, bien entendu, toujours moindre que celui de l'arc à air libre, la combustion des charbons étant infiniment plus lente et l'arc n'ayant pas de cratère lumineux.

» Si, dans la lampe minérale vase clos, le rendement lumineux diffère peu du rendement des lampes à air libre, ce doit être, à mon avis, à cause du taux très élevé de la minéralisation des

charbons spéciaux employés. Ce qui me le fait croire, c'est l'impossibilité de se servir de ces charbons dans les lampes ordinaires à air libre, à cause de la trop grande quantité des scories qui se produisent alors, scories qui ne se forment pas en vase clos.

» Le rendement lumineux n'est pas le seul point à considérer dans la question de l'éclairage industriel.

» On doit faire intervenir, en outre, les divers facteurs entrant en ligne de compte dans le prix de revient de la bougie-heure moyenne hémisphérique inférieure.

» Ces facteurs comprennent le prix d'achat de la lampe et ses frais d'entretien, le prix de l'énergie électrique, la dépense d'acquisition des charbons et celle de main-d'œuvre pour leur mise en place périodique.

» Voici deux Tableaux, résumant de très nombreuses expériences exécutées en Allemagne, en vue de comparer les prix de revient de l'éclairage électrique fourni par les divers systèmes par incandescence et par arc.

» La lampe vase clos à charbons minéralisés de M. Carbone figure dans ces Tableaux résumant ces expériences. Il ne s'agit bien entendu que de la lampe alternative, puisque celle à courant continu n'a été réalisée que postérieurement.

» J'emprunte ces Tableaux au travail très consciencieux présenté sur ce sujet, l'an dernier, par M. le Dr Conrad Norden à l'Association des Ingénieurs-Constructeurs des Machines de Berlin.

TABLEAU I.

Courant continu.

	I.	II.	III.	IV.	V.
Lampe différentielle à charbons purs....	2 ou 3	6 ou 15	360 ou 1300	0,9 ou 0,6	10 ou 18
Lampe triplex à charbons minéralisés, type Alba.....	3	6 ou 15	750 ou 3000	0,3 ou 0,18	12 ou 22
Lampe intense à charbons spéciaux, dite lampe en V.....	2	6 ou 12	1200 ou 3500	0,27 ou 0,19	6 ou 18
Lampe vase demi-clos, charbons à flamme.	1	6 ou 18	1000 ou 1600	0,6 ou 0,54	22 ou 30
Lampes à arc au mercure (quartz).....	1	4	1200	0,36	1000
	$\frac{1}{2}$ (1 sous 220°)	2,5 ou 3,5	1500 ou 3000	0,36 ou 0,26	1000

TABLEAU I (suite).

Courant alternatif.

	I.	II.	III.	IV.	V.
Lampe différentielle à charbons purs. . . .	3	6 ou 26	100 ou 900	2,1 ou 0,85	8 ou 15
Lampe triplex	3	8 ou 15	800 ou 3000	0,3 ou 0,25	8 ou 15
Lampe intense en V.	2	6 ou 12	1100 ou 3000	0,22 ou 0,15	6 ou 18
<i>Lampe vase clos,</i> <i>charbons purs</i>	3 (sous 220 ^v)	12	600	1	60

Légende :

Colonne I : Nombre de lampes en série sous 110 volts.

Colonne II : Intensité en ampères.

Colonne III : Intensité lumineuse moyenne hémisphérique inférieure en bougies Häfner.

Colonne IV : Consommation en volts par bougie moyenne hémisphérique inférieure.

Colonne V : Durée des charbons.

Ce Tableau fait ressortir l'infériorité marquée de l'arc à charbons ordinaires avec le courant alternatif.

Les lampes en V sont munies de charbons à flamme.

La lampe à arc au mercure ne fonctionne pas en alternatif.

TABLEAU II.

FRAIS D'EXPLOITATION PAR 1000 HEURES D'ÉCLAIRAGE. — LAMPES À ARC DONNANT 1000 BOUGIES.
Moyenne hémisphérique inférieure.

— 205 —

Courant continu.

Type de lampe.	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.	IX.	A.	B ₁₀ .	C ₃₃ .	D ₅₅ .	X.
Lampe différentielle à charbons ordinaires.....	12	660	18	1000	55 paires = 7,50	6,15	4	3	20,65	52,80	66	79,20	99	73,45
Lampe triplex, charbons mar- que Alba.....	8	204	21,30	1170	46 paires = 19,50	6,45	5	5	35,95	23,50	29,40	35,30	44,10	59,45
Lampe en V, charbons à flamme.	6	350	16	1190	62,5 p = 19,50	4	7	5	35,50	26,40	33	39,60	49,50	61,90
Lampe vase demi-clos à charbons ordinaires.....	6	660	30	1080	35 paires = 1,85	6,35	3,5	5	10,70	52,80	66	79,20	99	63,50
Lampe à incandescence à fila- ment métallique.....	2	1175	1000	1000	prix = 15,75	5,30	0	0	20,95	94	117,50	144	176,35	114,95
Lampe à arc au mercure, tube en quartz.....	4	440	1000	1200	prix = 32	0	0	5	37	35,20	44	52,80	66	72,20

Courant alternatif.

Lampe différentielle à charbons purs ordinaires.....	25	900	15	960	66 paires = 18,55	8,65	5	3	35,20	72	90	108	135	107,20
Lampe triplex, charbons mar- que Alba.....	10	265	20	1125	50 paires = 20,05	6,40	5,50	5	36,95	21,20	26,50	31,80	39,75	58,15
Lampe en V, charbons à flamme intensive.....	6	260	16	1120	62 paires = 19,20	4,35	5	5	35,45	20,80	26	31,20	39	56,25
LAMPE VASE CLOS MINÉRAL, charbons spéciaux miné- ralisés de M. Carbone.....	10	425	100	1100	prix = 5	1,60	1	5	12,60	34	42	51	73,75	46,60

Légende :

Colonne I : Nombre d'ampères.	Colonne V : Frais d'achat des charbons, en marks.
Colonne II : Watts dans l'arc.	Colonne VI : Droits fiscaux sur les charbons, en marks.
Colonne III : Durée d'éclairage, en heures, sans renouvellement de charbons.	Colonne VII : Frais de remplacement (main-d'œuvre), en marks.
Colonne IV : Bougies moyennes hémisphériques inférieures.	Colonne VIII : Frais d'entretien du matériel, en marks.
	Colonne IX : Frais totaux, en marks.
	Colonne X = Colonne IX + Colonne A.
	Colonne A à D : Prix de la fourniture du courant suivant les prix de vente de 8, 10, 12, 15 pfennigs, le kilowatt-heure.

» Le Tableau II vous montre que le prix de revient minimum est en faveur de la lampe en vase clos avec charbons minéralisés.

» Dans la lampe intensive avec charbons minéralisés disposition en V, qui se classe en second, le rendement lumineux est un peu supérieur ce qui s'explique par la combustion à l'air libre des crayons.

» Par contre, les frais de matière et de main-d'œuvre pour le remplacement des charbons sont plus élevés. La lampe en vase clos à électrodes minéralisées occupe donc définitivement la première place.

» L'économie qu'elle procure ressort de l'examen de la colonne X,

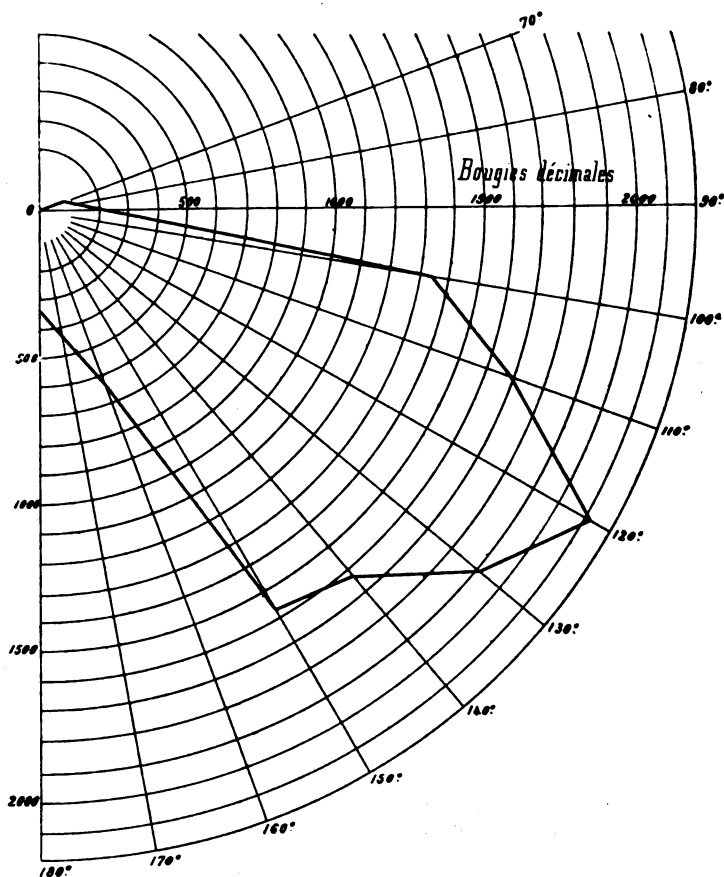


Fig. 4.

où l'on trouve la dépense totale en marks, dans l'hypothèse du kilowatt-heure coûtant 8 pfennings, pour obtenir une intensité

lumineuse moyenne hémisphérique inférieure de 1000 bougies maintenue pendant 1000 heures.

» La lampe Carbone à courant alternatif arrive à ne dépenser au total que 46,60 marks.

» Au point de vue de la répartition de la lumière dans l'hémisphère inférieure, je ne puis mieux faire que de vous montrer (*fig. 4*) la courbe obtenue au Laboratoire central d'Électricité. La lampe expérimentée était du modèle à courant continu, construite par M. Bardon, avec vase clos et charbons minéralisés spéciaux de M. Carbone; en voici les données :

Charbon supérieur, positif, diamètre.....	17 mm
Charbon inférieur, négatif, diamètre.....	12 mm
Intensité moyenne du courant.....	8,02 ampères
Tension aux bornes de la lampe.....	45,5 volts
Usure horaire du charbon positif.....	6 mm
Usure horaire du charbon négatif.....	5,6 mm
Puissance dépensée dans la lampe.....	365 watts
Intensité moyenne sphérique.....	762 bougies D
Flux lumineux total.....	9520 lumens
Intensité moyenne hémisphérique inférieure.....	1470 bougies D

Intensités lumineuses mesurées dans différentes directions pour construire la courbe (*fig. 4*) :

Angle avec la verticale de l'arc, en degrés.	Intensités lumineuses en bougies décimales.
60	0
70	87
80	117
90	255 (1)
100	1330
110	1680
120	2120
130	1920
140	1630
150	1570
160	624
170	136
180	346

» Comme vous pouvez vous en rendre compte cette courbe

(1) Horizontale de l'arc.

montre que la répartition lumineuse de la lampe en vase clos avec charbons minéralisés, est très favorable à l'éclairage de grands espaces.

» L'intensité lumineuse maximum de 2120 bougies fait, avec l'horizontale de l'arc, un angle de 30°.

» Au pied de la lampe, cette intensité est encore de 350 bougies malgré l'opacité de la chambre des dépôts.

» J'ajouterai enfin que ces lampes en vase clos, fonctionnant sous 45 volts, peuvent être montées en série par 2 ou par 4 respectivement sous 110 ou 220 volts, soit en continu soit en alternatif.

» La lampe que vous voyez fonctionner devant vous est alimentée par le courant du Secteur de la Rive gauche. Elle absorbe 8 ampères sous 45 volts aux bornes. Elle est branchée ici sur le secondaire d'un transformateur de 110/55 volts accompagné d'une bobine de self. La durée garantie des charbons est de 120 heures.

» Dans quelques jours, à l'Exposition de Physique de Pâques, vous pourrez voir fonctionner, ici même, un certain nombre de groupes de lampes Bardon à vase clos avec charbons minéralisés. Les uns seront alimentés par du continu, les autres par de l'alternatif.

» En terminant, Messieurs, j'insiste une dernière fois sur les difficultés techniques de toute nature que présentait la réalisation de l'éclairage par arc à charbons minéralisés, brûlant en vase clos.

» M. Carbone et notre collègue M. Bardon ont, en réunissant leurs efforts, résolu un problème d'une très grande importance industrielle. A l'un, nous devons l'original principe du vase clos condenseur et la création de charbons minéralisés appropriés; à l'autre, nous sommes plus particulièrement redevables d'une lampe bien adaptée au nouveau mode d'éclairage par alternatif et par continu.

» Comme conséquence de ces travaux, l'éclairage électrique par arc reprend, au point de vue économique, la première place qui lui avait été très sérieusement disputée depuis quelque temps. »

M. LECOMTE. — « De l'exposé très clair de notre collègue,

M. Guillez, il semble résulter que la lampe en vase clos à charbons minéralisés qu'il vient de nous présenter est une nouveauté.

» Je dois à la vérité de dire que le problème a déjà été résolu, à l'aide d'un vase clos d'une nature différente, par M. Ad.-D. Jones, dont les brevets sont exploités par la Compagnie Jandus.

» Les résultats obtenus en 1908 au Laboratoire central d'Électricité sur la lampe Jandus ne le cédaient en rien aux récents essais faits sur la lampe signalée, et je tiens à préciser ces faits, ne serait-ce que pour établir l'antériorité de la lampe Jandus.

» D'autre part, nous obtenons sans difficulté des arcs stables de 50 mm à 60 mm de longueur, et nous avons, contrairement à l'expérience de M. Bardon, eu plus de facilité à établir la lampe à courant continu qui existe depuis 1908, que la lampe à courants alternatifs qui est plus récente. »

M. le PRÉSIDENT répond à M. Lecomte que, en ce qui concerne les antériorités et l'application du principe du vase clos aux lampes à arc, la présentation de la lampe Jandus, faite à la Société, il y a quelques années, a donné lieu à un certain nombre d'observations et soulevé plusieurs revendications d'antériorité. Il était donc bien facile de voir, dès lors, que l'emploi du vase clos ne constituait pas une nouveauté et que l'intérêt de la Communication qui vient d'être faite réside surtout dans les perfectionnements apportés en dernier lieu à cette application. Il remercie M. Guillez de les avoir exposés.

SUR LES COEFFICIENTS D'INDUCTANCE.

M. BOUCHEROT. — « Messieurs, j'ai profité de ce que l'ordre du jour n'était pas très chargé ce soir pour m'y faire inscrire et attirer l'attention des membres de la Société sur l'utilité qu'il y aurait à ce qu'ils s'employassent pour obtenir, des électriciens en général, de bien distinguer dans le langage courant entre les différents coefficients d'inductance qu'on est appelé à considérer en Électrotechnie pour un même circuit d'un appareil ou d'une machine.

» On parle de self-induction un peu trop à tort et à travers : il n'est pas rare de voir, dans un même Mémoire, donner ce même nom de *self-induction* à des choses très différentes, dont l'une est de 20 à 500 fois plus petite que l'autre.

» C'est surtout sous l'influence de certains auteurs étrangers qu'est née cette confusion. Les auteurs français ont en général conservé à la self-induction son sens physique précis et primitif; mais, par contre, les traducteurs d'Ouvrages étrangers, qui ne comprennent pas toujours parfaitement ce qu'ils traduisent, sont, en majeure partie, responsables de la confusion que je veux signaler ⁽¹⁾.

» Vous voudrez bien m'excuser si j'ai l'air de faire un cours, mais, pour traiter clairement de cette question, il est impossible de ne pas faire de théorie, il faut remonter aux sources de l'Électrotechnie, c'est-à-dire à la Physique.

» Lorsqu'un circuit électrique est seul, ou en présence d'autres circuits ouverts, ce qui revient au même, il a un coefficient de self-inductance L , et c'est tout. Ce coefficient est défini par le produit $n\mathcal{F}$ du nombre de spires du circuit par le flux magnétique $\mathcal{F}$ qu'il embrasse lorsqu'il est parcouru par un courant égal à une unité C. G. S., c'est-à-dire 10 ampères.

⁽¹⁾ Ce n'est pas là le seul reproche qu'il y ait à faire aux traducteurs; on peut dire qu'en général (les exceptions confirment la règle) ils travaillent un peu trop d'accord avec leurs auteurs à faire oublier ce qui est dû à nos compatriotes.

» Mais dès que les autres circuits en présence sont fermés sur quoi que ce soit, il y a un grand nombre de coefficients d'inductance à considérer. En limitant à deux le nombre total des circuits en présence, en les supposant fixes et dans un milieu de conformation magnétique invariable, il y a intérêt à envisager, au point de vue électrotechnique, sept coefficients d'inductance que je symboliserai et dénommerai de suite ainsi :

L_1 , coefficient de self-inductance du circuit 1;

L_2 , coefficient de self-inductance du circuit 2;

M , coefficient de mutuelle inductance entre les deux;

$\mathcal{L}_1$, coefficient de self-inductance de fuites du circuit 1;

$\mathcal{L}_2$, coefficient de self-inductance de fuites du circuit 2;

$\mathcal{K}_1$, coefficient d'inductance des fuites totales au circuit 1;

$\mathcal{K}_2$, coefficient d'inductance des fuites totales au circuit 2.

» Ces coefficients sont liés entre eux par certaines relations que nous allons poser en examinant chacun d'eux.

» L_1 et L_2 sont les coefficients d'inductance proprement dits, définis comme si chaque circuit était seul :

$$L_1 = n_1 \mathcal{F}_1, \quad L_2 = n_2 \mathcal{F}_2,$$

n_1 et n_2 étant les nombres de spires, $\mathcal{F}_1$ le flux qu'embrasse le circuit 1 lorsqu'il est seul parcouru par un courant de 10 ampères, $\mathcal{F}_2$ le flux qu'embrasse le circuit 2 lorsqu'il est seul parcouru par un courant de 10 ampères.

» D'autre part, M est défini par

$$M = n_2 k_1 \mathcal{F}_1 = n_1 k_2 \mathcal{F}_2,$$

$k_1 \mathcal{F}_1$ étant la portion du flux $\mathcal{F}_1$ qui traverse le circuit 2 quand le circuit 1 est parcouru par un courant de 10 ampères, et $k_2 \mathcal{F}_2$ étant la portion du flux $\mathcal{F}_2$ qui traverse le circuit 1 quand le circuit 2 est parcouru par un courant de 10 ampères ⁽¹⁾.

» Il y a alors pour chacun des circuits un coefficient de self-inductance *de fuites* qui correspond à la portion du flux de self-

⁽¹⁾ Les k sont ici les inverses des ν d'Hopkinson. Je préfère exprimer les choses ainsi, parce que ν est le symbole réservé au potentiel.

induction $(1 - k) \mathcal{F}$ qui n'est pas commune :

$$\mathcal{L}_1 = L_1 = n_1 k_1 \mathcal{F}_1, \quad \mathcal{L}_2 = L_2 = n_2 k_2 \mathcal{F}_2,$$

ou encore

$$\mathcal{L}_1 = L_1 - \frac{n_1}{n_2} M, \quad \mathcal{L}_2 = L_2 - \frac{n_2}{n_1} M.$$

» Et voilà où commence la confusion : bien des auteurs appellent encore les coefficients $\mathcal{L}_1$ et $\mathcal{L}_2$ coefficients de self-inductance, sans ajouter *de fuites*.

» Elle continue ainsi :

» Évidemment on a

$$M^2 = (L_1 - \mathcal{L}_1)(L_2 - \mathcal{L}_2),$$

égalité qui se réduit à $M^2 = L_1 L_2$ dans le transformateur idéal sans fuites.

» Supposons qu'on affecte artificiellement toutes les fuites au circuit 1, en lui attribuant un coefficient d'inductance *des fuites totales* $\mathfrak{L}_1$, on aura de même

$$M^2 = (L_1 - \mathfrak{L}_1) L_2,$$

d'où

$$\mathfrak{L}_1 = L_1 - \frac{M^2}{L_2}.$$

» On peut de même affecter toutes les fuites au circuit 2 en lui attribuant un coefficient d'inductance des fuites totales $\mathfrak{L}_2$:

$$\mathfrak{L}_2 = L_2 - \frac{M^2}{L_1}.$$

» Or, on rencontre fréquemment les expressions $\mathfrak{L}_1$ et $\mathfrak{L}_2$ dans les études électrotechniques.

» Par exemple, si l'on met le secondaire d'un transformateur en court-circuit, et si l'on néglige momentanément l'influence des résistances des enroulements, ce qu'on peut faire pratiquement, on a, au secondaire,

$$L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt} = 0,$$

d'où

$$i_2 = -i_1 \frac{M}{L_2};$$

d'où la f. e. m. primaire

$$e_1 = L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} = \left(L_1 - \frac{M^2}{L_2} \right) \frac{di_1}{dt} = \mathfrak{L}_1 \frac{di_1}{dt};$$

ce qui veut dire : quelle que soit la forme du courant, $\mathfrak{K}_1$ est la self-induction *apparente* du primaire quand le secondaire est en court-circuit. Pour cette raison, certains auteurs appellent encore $\mathfrak{K}_1$ la self-induction du primaire. C'est évidemment aussi dépourvu de sens que pour la self-inductance de fuites. Numériquement, on a dans un transformateur $L_1 = 200$ à $1000 \text{ } \mathfrak{L}$, et $\mathfrak{K}_1 = 2$ à $5 \text{ } \mathfrak{L}$; on voit ainsi à quelles erreurs on peut s'exposer en ne distinguant pas nettement entre ces grandeurs. $\mathfrak{L}_1$ est une fraction de L_1 ; on peut donc appeler $\mathfrak{L}_1$ une self-inductance, mais en ayant soin d'ajouter *de fuites*. Quant à $\mathfrak{K}_1$, ce n'est pas une partie de L_1 , puisque ce coefficient comprend les fuites du circuit 2; on ne peut donc pas dire que c'est une self-inductance; c'est une inductance, mais il faut ajouter *des fuites totales* ramenées au primaire pour éviter toute confusion.

» Mais, dira-t-on, est-il vraiment nécessaire d'envisager tous ces coefficients? J'en suis certain, parce qu'on les rencontre constamment en Électrotechnie; et, chose singulière, on rencontre beaucoup plus souvent les coefficients $\mathfrak{K}$ que les coefficients $\mathfrak{L}$. Je me propose, pour justifier ces affirmations, de passer rapidement en revue devant vous les principales questions dont l'étude amène la considération de ces coefficients.

» *Transformateurs statiques.* — Si l'on veut calculer les fuites d'un transformateur, on procédera en calculant séparément $\mathfrak{L}_1$ et $\mathfrak{L}_2$ d'après leurs définitions; mais la détermination expérimentale de ces deux coefficients est très difficile, pour ne pas dire impossible : ils sont très petits en regard de L_1 et L_2 et les effets qui pourraient servir à les déterminer sont masqués en partie par d'autres tels que pertes dans le fer, etc. Au contraire, $\mathfrak{K}_1$ et $\mathfrak{K}_2$ sont très faciles à déterminer par expérience au moyen d'un voltmètre et d'un ampèremètre, comme L_1 et L_2 , en alimentant le circuit considéré, l'autre étant ouvert ou en court-circuit, puisqu'on a, à secondaire ouvert :

$$I_{1v} = \frac{U_1}{\omega L_1} \text{ (}^1\text{)};$$

(¹) En réalité, pour la détermination de L_1 en toute rigueur, les pertes dans le fer obligent à une correction; elles sont sans influence pratique sur la détermination de $\mathfrak{K}_1$.

à secondaire court-circuité :

$$I_{1cc} = \frac{U_1}{\omega \mathfrak{L}_1}.$$

» D'autre part, il est utile de remarquer qu'il existe entre $\mathfrak{L}_1$ et $\mathfrak{L}_2$ un rapport assez complexe :

$$\frac{\mathfrak{L}_1}{\mathfrak{L}_2} = \frac{n_2 L_1 - n_1 M}{n_1 L_2 - n_2 M},$$

tandis qu'il y a entre $\mathfrak{L}_1$ et $\mathfrak{L}_2$ le même rapport simple qu'entre L_1 et L_2 :

$$\frac{\mathfrak{L}_1}{\mathfrak{L}_2} = \frac{L_1}{L_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2.$$

» La théorie physique du transformateur à intensité efficace primaire constante est très simple; l'équation des f. e. m. dans le secondaire

$$M \frac{di_1}{dt} + (R + R_2) i_2 + (L_1 + L_2) \frac{di_2}{dt} = 0,$$

dans laquelle R_2 et L_2 se rapportent au circuit secondaire, R et L au circuit extérieur, indique, en effet, que la f. e. m. efficace de mutuelle induction, $M\omega I_1$, agit simplement sur un circuit doué d'une résistance $(R + R_2)$ et d'une self-inductance $(L + L_2)$, problème que les étudiants sont appelés à traiter dès qu'ils abordent l'étude des courants alternatifs. On en déduit immédiatement que, si L est nul ou invariable, l'intensité secondaire peut être pratiquement constante dans certaines limites d'application, parce que ωL_2 peut rester toujours beaucoup plus grand que $(R + R_2)$.

» Beaucoup moins simple à faire est la théorie du fonctionnement à différence de potentiel efficace primaire constante, ou, en langage raccourci, à tension primaire constante. Il faut en effet, après avoir déterminé I_2 en fonction de I_1 , comme nous venons de voir, déduire U_1 en fonction de I_2 , et par conséquent de I_1 , par l'équation des f. e. m. dans le primaire, écrire que U_1 est constant, en déduire ensuite U_2 et I_2 en fonction de U_1 .

» On arrive bien plus rapidement à ce qu'on désire faire connaître par la remarque suivante :

» Les équations des f. e. m. dans les deux circuits sont :

$$(1) \quad M \frac{di_2}{dt} + L_1 \frac{di_1}{dt} + R_1 i_1 = u_1,$$

$$(2) \quad M \frac{di_1}{dt} + L_2 \frac{di_2}{dt} + R_2 i_2 + u_2 = 0.$$

» En tirant i_1 de (1) et remplaçant dans (2) il vient

$$\frac{M}{L_1}(u_1 - R_1 i_1) + \mathfrak{X}_2 \frac{di_2}{dt} + R_2 i_2 + u_2 = 0.$$

» Or $\frac{M}{L_1}$ est à peu de chose près le coefficient de transformation $\frac{n_2}{n_1}$:

$$\frac{M}{L_1} = \frac{n_2 k_1 \tilde{\mathfrak{X}}_1}{n_1 \tilde{\mathfrak{X}}_1} = \frac{n_2}{n_1} k_1;$$

c'est le coefficient de transformation *réel*. Cette équation est donc celle du fonctionnement à intensité constante (2), mais avec remplacement :

» 1^o De la f. e. m. de mutuelle induction par la tension primaire transformée;

» 2^o De la self-inductance du secondaire par l'inductance des fuites totales au secondaire.

» Le résultat pratique est par contre tout différent : comme $\mathfrak{X}_2$ est beaucoup plus petit que L_2 , la tension secondaire est presque constante puisque les choses se passent comme si le secondaire était une source à tension constante ayant une résistance très faible $\left[R_2 + R_1 \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2 \right]$ et une réactance très faible $\omega \mathfrak{X}_2$.

» Dans l'étude des changements de régime, avec introduction des exponentielles ce sont encore les coefficients $\mathfrak{X}_1$ et $\mathfrak{X}_2$ qui apparaissent.

» *Appareils à champ tournant : Transformateurs et moteurs.* — Ici les coefficients de mutuelle inductance entre les circuits fixes et les circuits mobiles sont variables, généralement des fonctions sinusoïdales du temps. Mais, si l'appareil est vraiment polyphasé dans chacune de ses parties, on retrouve pour chacun des circuits les coefficients d'inductance L , $\mathfrak{L}$ et $\mathfrak{X}$ vus précédemment pour le transformateur statique, mais M est alors le maximum des coefficients de mutuelle inductance, maximum qui est le même pour tous.

» Considérons (*fig. 1*) de préférence un système diphasé. Les théories générales sont en effet toujours bien plus rapidement obtenues avec les systèmes diphasés qu'avec les systèmes triphasés, parce qu'il n'y a pas de mutuelle induction entre les deux circuits d'un même organe, tandis qu'il y en a entre les trois circuits d'un

organe triphasé. 1 et 1' sont les deux circuits fixes, 2 et 2' les deux circuits mobiles. Faisons passer 10 ampères dans le circuit 1; il embrasse un flux $\mathcal{F}_1$, tel que

$$L_1 = n_1 \mathcal{F}_1.$$

- » Aucune partie de ce flux ne traverse le circuit 1'.
- » Une partie $k_1 \mathcal{F}_1$ de ce flux traverse l'ensemble des circuits 2

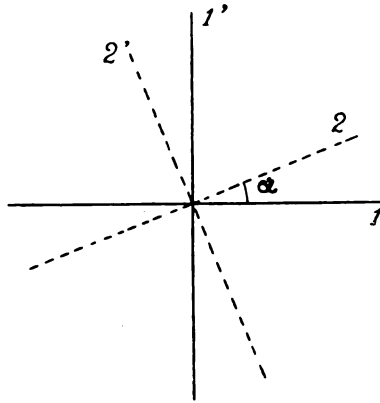


Fig. 1.

et 2' : la composante $k_1 \mathcal{F}_1 \cos \alpha$ traverse le circuit 2 et la composante $k_1 \mathcal{F}_1 \sin \alpha$ traverse le circuit 2'; les mutuelles inductances sont :

$$M \cos \alpha \text{ , entre 1 et 2,}$$

$$M \sin \alpha \text{ , entre 1 et 2'.}$$

en sorte qu'on a encore :

$$M = n_2 k_1 \mathcal{F}_1,$$

$$L_1 = \mathcal{L}_1 + n_1 k_1 \mathcal{F}_1 = \mathcal{L}_1 + \frac{n_1}{n_2} M,$$

$$L_2 = \mathcal{L}_2 + \frac{n_2}{n_1} M,$$

$$\mathfrak{L}_1 = L_1 - \frac{M^2}{L_2},$$

$$\mathfrak{L}_2 = L_2 - \frac{M^2}{L_1}.$$

» On trouve encore à circuits secondaires ouverts

$$I_{1v} = \frac{U_1}{\omega L_1}$$

et, à circuits secondaires court-circuités,

$$I_{cc} = \frac{U_1}{\omega \mathcal{X}_1}.$$

» Comme pour les transformateurs statiques, la théorie des moteurs asynchrones polyphasés à intensité efficace primaire constante est très rapidement faite, car on a alors, dans chacun des circuits de rotor, une force électromotrice efficace $(\omega - \Omega) MI$, agissant simplement sur une résistance R_2 et une self-inductance L_2 , d'où l'on déduit le courant secondaire et le couple (Ω est la vitesse angulaire du rotor).

» Signalons en passant, à ce sujet, que certains auteurs croient faire ainsi la théorie à tension primaire constante, parce qu'ils substituent le champ (inducteur) à la f. e. m. de mutuelle induction. Il est cependant évident que la constance du champ inducteur implique la variation de la tension aux bornes de l'inducteur, par l'influence du champ induit, en employant leur langage, et que c'est le champ résultant qui doit être constant pour que la tension aux bornes de l'inducteur reste constante.

» A tension efficace primaire constante, la théorie du fonctionnement est plus compliquée; mais par une transformation analogue à celle que nous avons faite plus haut, quoique un peu plus longue à exécuter, on remarque encore que la formule du couple à U , constant est la même que celle du couple à I , constant en remplaçant la f. e. m. de mutuelle induction $(\omega - \Omega) MI$, par la tension primaire transformée $\frac{M}{L_1} \frac{\omega - \Omega}{\omega} U$, et la self-inductance secondaire L_2 par l'inductance des fuites totales au secondaire $\mathcal{X}_2$.

» On en déduit immédiatement les circonstances du fonctionnement que vous connaissez, le diagramme de M. Blondel, etc.

» *Alternateurs.* — Dans la théorie physique générale simplifiée des alternateurs, qui suppose les circuits magnétiques non saturés, c'est la self-induction totale L_2 de l'induit qu'on utilise, avec la f. e. m. de mutuelle secondaire E_2 qu'on appelle la f. e. m. de l'alternateur.

» Le courant de court-circuit de l'induit est alors

$$I = \frac{E_2}{\omega L_2},$$

et l'on établit comme vous savez la forme elliptique générale de U_2 en fonction de I_2 , à excitation et f. e. m. constante, qui se ramène au cercle pour le débit en phase avec U_2 , et à la droite pour le débit en quadrature. Il en est de même dans la théorie générale du couplage en parallèle des alternateurs et dans celle des moteurs synchrones.

» Pour la clarté de l'exposition au point de vue physique de ces phénomènes, il est bien plus avantageux de faire ainsi, mais lorsqu'on en arrive à traiter, en Électrotechnie, du calcul industriel des alternateurs, on est obligé, toutes ces machines ayant aujourd'hui des circuits magnétiques saturés, de séparer L_2 en ses deux composantes $\mathcal{L}_2$ et $\frac{n_2}{n_1} M$. Leurs influences sont en effet très différentes : la première exige, lorsque l'alternateur débite, une augmentation du flux réel à faire passer dans le circuit magnétique, ce qui peut être en certains cas très pénible, tandis que la seconde ne demande qu'une augmentation des ampères-tours inducteurs égale aux contre-ampères-tours induits.

» L'équation physique

$$\overline{U_1} = \overline{E_1} - \overline{\omega L_1 I_1} - \overline{R_1 I_1}$$

dans laquelle

$$E_1 = \frac{\omega M J}{\sqrt{2}}$$

(où J est le courant inducteur) se transforme en l'équation électrotechnique

$$\overline{U_1} = \frac{\omega M}{n_1 \sqrt{2}} (\overline{n_1 J} - \overline{n_1 I_1 \sqrt{2}}) - \overline{\omega \mathcal{L}_1 I_1} - \overline{R_1 I_1}$$

(dans le cas de diphasé), qui symbolise la construction de Potier : triangle de tensions et triangle d'ampères-tours superposés.

» C'est ici $\mathcal{L}_2$ qui entre en jeu pour la raison de saturation que j'indiquais plus haut.

» L'écart entre $\mathcal{L}_2$ et L_2 est moins grand dans un alternateur que dans un transformateur ; cela résulte de deux influences qui tendent à rapprocher ces deux coefficients dans un alternateur : 1° les circuits primaires et secondaires ne sont pas intimement confondus comme dans un transformateur, ce qui augmente les fuites ; 2° il y a un entrefer dans le circuit magnétique, ce qui diminue la self-inductance totale.

» L_2 vaut ici de 10 à 20 fois $\mathcal{L}_2$, mais la confusion n'en est pas moins déplorable quand on appelle $\mathcal{L}_2$ la self-induction de l'induit; les étudiants ne comprennent plus alors pourquoi il faut tenir compte à la fois de la self-induction et de la réaction de l'induit. De même ils sont tout à fait égarés lorsqu'on appelle, comme certains auteurs le font, la résultante de

$$\overline{U_2} + \overline{\omega \mathcal{L}_2 I_2} + \overline{R_2 I_2}$$

la force électromotrice. C'est une f. e. m., mais ce n'est pas la f. e. m. E_2 qui est la résultante de

$$\overline{U_2} + \overline{\omega L_2 I_2} + \overline{R_2 I_2}.$$

toujours très supérieure à la première.

» Les coefficients $\mathfrak{L}_1$ et $\mathfrak{L}_2$ réapparaissent dans l'étude des changements de régime d'un alternateur et des surtensions ou surintensités qui peuvent en résulter. Dans la question, très importante en ce moment pour les groupes à turbines, des phénomènes qui suivent la mise en court-circuit brusque d'un alternateur, on les voit de nouveau reprendre toute leur importance. Il en est de même dans celle des surtensions qui suivent la rupture d'un court-circuit, au sujet de laquelle on répète gravement de grosses erreurs.

» Mais je ne puis que signaler la chose en passant, parce qu'il faudrait la durée d'une communication entière pour exposer cette seule question.

» *Machines à courant continu.* — Enfin l'étude de la commutation dans les machines à courant continu donne encore lieu fréquemment à des confusions regrettables entre les coefficients d'inductance.

» On dit couramment : la self-induction de la section en court-circuit donne lieu à une f. e. m. par suite de la variation du courant dans cette section de $-\frac{I}{2}$ à $+\frac{I}{2}$, etc.

» Or il est facile de se rendre compte qu'il ne s'agit pas là de la self-inductance totale L_1 de la section comme si elle était seule, ainsi qu'on semble le croire souvent.

» Ceci mérite quelques précisions. Je laisserai de côté le cas où plusieurs sections voisines sont mises en court-circuit par le

même balai et s'influencent mutuellement pendant la commutation, pour m'en tenir à celui que l'on considère généralement d'une seule section en court-circuit sous chaque balai.

» C'est surtout avec l'anneau Gramme que cette manière de parler prête à confusion : la self-inductance d'une section Gramme, considérée seule, est considérable, puisque le circuit magnétique sur lequel elle est enroulée, l'anneau, a une réluctance très petite. La self-inductance d'une section Gramme, au sens propre du mot, est beaucoup plus grande que l'inductance qui intervient dans la commutation, comme nous allons le voir.

» Tout d'abord, supposons qu'il n'y ait (*fig. 2*), sur un anneau

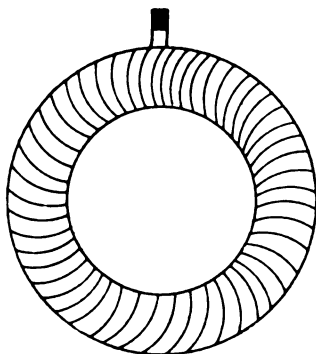


Fig. 2.

Gramme bipolaire, qu'une section en court-circuit; on voit aisément qu'elle constitue, en quelque sorte, le primaire d'un transformateur dont le secondaire est constitué par le reste des sections de l'anneau *en court-circuit également* par le même balai. Dans ce cas l'inductance à compter pour la section est $\mathfrak{x}_2$, inductance des fuites totales ramenées à la section en commutation. Mais le phénomène est plus compliqué encore, parce qu'il y a en même temps deux sections en commutation diamétralement opposées sur l'induit. Les variations de courant dans ces deux sections sont, à chaque instant, égales et contraires; il n'y a plus alors de courant induit secondaire dans les autres sections et l'inductance à compter pour chaque section court-circuitée est sa self-inductance de fuites $\mathfrak{x}_1$, l'autre *seule* étant considérée comme secondaire. Mais jusqu'ici nous avons fait abstraction de l'inducteur; nous avons supposé l'induit simplement dans l'air; les choses se compliquent encore

de la présence du circuit magnétique inducteur et de ses bobines. Le circuit magnétique inducteur offre un passage nouveau aux flux des sections court-circuitées (fig. 3), de perméance plus grande

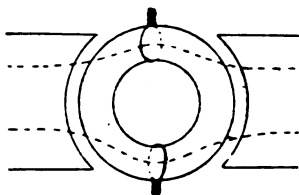


Fig. 3.

que l'air ambiant que nous avons précédemment. Mais comme les variations de ces flux sont très rapides, des courants de Foucault se développent dans la masse de l'inducteur et un courant périodique prend naissance dans les bobines inductrices; l'un et les autres ne laissent finalement passer qu'une petite partie du flux, qui les développe, à la manière du courant secondaire d'un transformateur en court-circuit; l'un et les autres engendrent autour d'eux des fuites magnétiques qui, en dernier ressort, sont évidemment empruntées aux sections court-circuitées et s'ajoutent à celles propres à ces sections. L'inductance à introduire dans les calculs n'est donc pas non plus la self-inductance de fuites $\mathfrak{L}_1$ des sections court-circuitées, mais *une* inductance de fuites totales $\mathfrak{L}_1$, issue de l'ensemble de ces circonstances et difficile à prédéterminer exactement.

» Avec l'enroulement en tambour l'expression « self-inductance » de la section en court-circuit » est moins incorrecte qu'avec l'enroulement Gramme, parce que cette self-inductance, prise au sens propre du mot, est bien inférieure à celle de deux sections Gramme de même nombre de spires, et est de l'ordre de grandeur d'une self-inductance de fuites; le flux de self-induction d'une spire tambour est, en effet, en grande partie dans l'air, tandis que celui d'une spire Gramme est presque entièrement dans le fer. Mais l'expression est tout de même incorrecte puisque, comme pour l'enroulement Gramme, il y a mutuelle induction avec la masse et les bobines de l'inducteur; l'inductance à introduire dans les calculs est encore *une* inductance de fuites totales $\mathfrak{L}_1$.

» Je pense, Messieurs, avoir suffisamment mis en évidence, par

cet exposé rapide, la nécessité d'envisager distinctement les divers coefficients d'inductance d'un même circuit électrique.

» Ainsi que je le disais en commençant, la confusion à cet égard n'est pas limitée à un pays particulier, elle est internationale. Je crois donc qu'un jour ou l'autre, la question devra venir devant la Commission électrotechnique internationale. Comme presque tous les membres du Comité électrotechnique français sont de notre Société, et qu'il s'agit là d'une question éminemment électrotechnique, j'exprime l'espoir qu'ils voudront bien prendre ma proposition en considération et l'étudier. Elle se réduit à appeler :

» 1^o *Self-inductance totale*, ou *self-inductance* tout court, d'un circuit d'un appareil, la self-inductance qu'il a lorsque les autres circuits sont ouverts;

» 2^o *Self-inductance de fuites*, la portion de la précédente qui correspond au flux qui ne traverse aucun autre circuit;

» 3^o *Inductance des fuites totales* au circuit considéré, la self-inductance apparente de ce circuit lorsque les autres sont fermés sur eux-mêmes.

» Parallèlement on aurait, en multipliant les coefficients d'inductance par la pulsation :

» La réactance d'un circuit : ωL_1 ;

» La réactance de fuites de ce circuit : ωL_2 ;

» La réactance des fuites totales ramenées à ce circuit : ωX_1 . »

M. le PRÉSIDENT remercie M. Boucherot des intéressantes remarques qu'il a bien voulu, avec sa grande autorité en la matière, exposer devant la Société.

Le dépouillement du scrutin étant terminé, M. le PRÉSIDENT proclame le résultat des élections pour le renouvellement statutaire du Comité d'administration et de la Commission des comptes, savoir :

Suffrages exprimés.....	350
Majorité.....	176

PRÉSIDENT

Pour l'exercice 1912-1913 :

M.		Nombre de voix obtenues.
GROSSELIN (M.), Ingénieur civil des Mines.....		342

VICE-PRÉSIDENTS :

MM.	Nombre de voix obtenues.
FERRIÉ (G.), Chef de bataillon du Génie.....	348
MARCHENA (DE), Ingénieur en chef de la <i>Compagnie française Thomson-Houston</i>	345

SECRÉTAIRE GÉNÉRAL :

VALBREUZE (R. DE), Administrateur délégué des anciens <i>Établissements Deberghe et Lafaye</i>	349
--	-----

SECRÉTAIRES :

BUREAU (H.), Chef de Travaux au Laboratoire central d'Électricité..	350
GORCE (P. DE LA), Chef de Travaux au Laboratoire central d'Électricité.....	349

MEMBRES :

BARBILLION (L.), Directeur de l'Institut électrotechnique, à l'Université de Grenoble.....	348
BORIS (R.), Ingénieur de la Marine.....	348
CELLERIER (J.), Directeur du Laboratoire d'essais au <i>Conservatoire national des Arts et Métiers</i>	349
CORDIER (F.), Chef d'Escadron au 11 ^e régiment d'Artillerie.....	348
CORDIER (G.), Administrateur délégué de la <i>Société « L'Énergie électrique du Littoral méditerranéen »</i>	347
DAVID (Ch.), Ingénieur-Conseil.....	348
DEHENNE (G.), Ingénieur en chef aux <i>Établissements Harlé et C^{ie}</i> ...	349
DEVAUX-CHARBONNEL (X.), Ingénieur des Télégraphes.....	348
GUILLAUME (Ch.-Ed.), Directeur adjoint du Bureau international des Poids et Mesures.....	349
JOLY (L.), Ingénieur aux <i>Ateliers Carpentier</i>	349
LABOUR (E.), Ingénieur.....	346
LIOUVILLE (L.), Ingénieur des Arts et Manufactures.....	347
LORIN (Ch.), Ingénieur des Arts et Manufactures.....	348
MAZEN (A.), Ingénieur principal du Service électrique des <i>Chemins de fer de l'État</i>	344
RATEAU (A.), Professeur à l'École supérieure des Mines.....	350
VILLARD (P.), Membre de l'Institut.....	348

Pour 2 ans :

SARTIAUX (Eug.), Ingénieur chef des Services électriques au <i>Chemin de fer du Nord</i>	339
--	-----

COMMISSION DES COMPTES :

BELUGOU (V.), Ingénieur en chef des <i>Postes et des Télégraphes</i>	350
BRYLINSKI (E.), Directeur de la <i>Société « Le Triphasé »</i>	349
COURTOIS (G.), Ingénieur des Arts et Manufactures.....	349

ALLOCUTION DE M. A. BOCHET, PRÉSIDENT SORTANT.

« Mes chers Collègues, les rapports qui vous ont été soumis par MM. Cellerier, de Valbreuze et Janet témoignent de la prospérité morale et matérielle de notre Société.

» C'est pour moi un agréable devoir de remercier en son nom les collaborateurs dévoués auxquels sont dus de si heureux résultats.

» Nos remerciements s'adressent tout d'abord à ceux qui ont assuré l'attrait de nos séances et l'intérêt du *Bulletin* par la communication de leurs travaux.

» La sécurité financière indispensable à notre œuvre nous est garantie depuis de longues années par la sage administration de notre trésorier, aussi compétent que dévoué, notre excellent collègue, M. Violet. Je tiens à lui dire une fois de plus combien ses éminents services sont appréciés.

» Notre très aimable secrétaire général, M. de Valbreuze, a droit à toute notre gratitude pour la haute distinction avec laquelle il accomplit ses délicates fonctions.

» Notre collaboration m'a permis de le mieux connaître et, partant, de goûter chaque jour davantage ses qualités de cœur et d'esprit.

» M. Janet a persisté avec succès dans sa lourde tâche d'amélioration constante du Laboratoire central d'Électricité et de l'École supérieure d'Électricité. Il y a été grandement aidé par la haute compétence et l'actif dévouement de MM. Chaumat et Laporte.

» C'est un bien vif plaisir pour moi de dire ce soir, devant vous, combien m'a été précieuse la collaboration de mon excellent et très ancien ami, M. Sabourain, qui, depuis l'origine de notre Société, remplit si parfaitement les fonctions de secrétaire du Comité.

» Notre agent administratif, M. Tessier, remplit sa mission avec un zèle et une ponctualité méritoires.

» Je ne puis remercier ici chacun de nos dévoués collaborateurs. Mais je tiens à leur dire que leurs services sont appréciés comme ils le méritent, jusque dans les fonctions les plus modestes.

» C'est avec joie que j'exprime, aux nouveaux élus dont je viens de proclamer les noms, les souhaits de bienvenue de la Société internationale des Électriciens. Vous avez été particulièrement bien inspirés en appelant à la présidence, pour l'exercice 1912-1913, notre collègue, M. Grosselin, dont les mérites et le dévouement pour notre Société se sont manifestés, si heureusement déjà, dans les fonctions de Secrétaire général qu'il a remplies de 1901 à 1905.

» Je me garderai, mes chers Collègues, de reprendre l'exposé des travaux accomplis durant l'exercice qui prend fin.

» Je me permettrai cependant d'insister sur l'intérêt d'excursions telles que celles qui nous ont conduits à Lens et à Bruxelles en octobre dernier, puis dans les Alpes et sur les rivages de la Méditerranée au mois de mars.

» Ces visites techniques assurent aux participants des enseignements infiniment profitables; elles nous mettent en rapport avec des collègues de diverses régions qui ne peuvent assister à nos séances; elles élargissent grandement l'action utile de notre Société et en accroissent ainsi la vitalité.

» Tandis que le Laboratoire central d'Électricité étend chaque jour sa notoriété et son champ d'action, son rôle auprès de l'État, qui l'a institué, doit devenir plus important par le fait des mesures législatives en préparation sur les unités électriques. La conclusion des pourparlers importants que nous avons eus depuis un an avec l'Administration me permet d'exprimer la conviction que l'État fera largement appel, à cette occasion, aux services que peut rendre le Laboratoire central d'Électricité, sous la direction de la Société internationale des Électriciens à laquelle sont entièrement dus la création et le brillant développement de cet Établissement.

» La vive sollicitude de notre Société pour l'École supérieure d'Électricité ne s'est pas non plus démentie. Une étude approfondie de l'extension de son enseignement a été engagée en vue de répondre aux nécessités modernes de l'instruction technique, sûr

moyen de garantir l'avenir et le développement de notre École.

» L'année qui se termine a donc été favorable pour l'ensemble de notre Société, grâce aux collaborateurs dont je viens de faire l'éloge mérité.

» J'ajouterai que si, pour ma part, je me suis efforcé à remplir de mon mieux la mission que vous m'avez confiée, j'aurais vivement souhaité que mes services justifiasse davantage l'honneur dont vous m'avez comblé et dont je vous suis infiniment reconnaissant.

» J'éprouve à l'heure présente la satisfaction que ressent le capitaine qui vient de ramener son navire à bon port, après les aléas d'une traversée.

» Au moment où j'amène mon pavillon modeste, c'est avec un légitime orgueil que nous voyons s'élever au-dessus de nos têtes celui de l'illustre savant qui a bien voulu consentir à guider nos travaux durant l'année sociale qui commence.

» Je serai, j'en suis sûr, votre interprète fidèle en le remerciant de l'honneur qu'il fait ainsi rejaillir sur notre chère Société.

» C'est dans cette pensée que je prie M. Lippmann d'inaugurer sa présidence de la Société internationale des Électriciens. »
(*Applaudissements.*)

M. G. LIPPMANN, *Président entrant*, remercie l'Assemblée générale qui, par ses suffrages, l'appelle à l'honneur de présider la Société internationale des Électriciens ; il se félicite d'en avoir été l'un des premiers membres fondateurs et s'efforcera de contribuer à sa prospérité croissante.

La séance est levée à 10 h 35 m du soir.

CORRESPONDANCE.

AU SUJET DES UNITÉS PHOTOMÉTRIQUES.

A l'occasion de la très intéressante conférence dans laquelle M. Laporte a fait le récit de son voyage aux États-Unis et des travaux photométriques américains, dont il a fait l'exposé, M. Blondel a soumis à la Société des Électriciens des propositions élaborées par le Comité des unités et étalons de l'Illuminating Engineering Society pour l'adoption définitive d'un système international de grandeurs et d'unités photométriques. Ces propositions, présentées par M. Humphreys, président, sur un rapport signé de MM. Sharp, président du Subcommittee, Blondel, Kennelly, Nichols et Rosa, membres, sont sensiblement en concordance avec le système adopté par le Congrès international des Électriciens de Genève en 1896. Elles présentent en outre deux améliorations, qu'il y a lieu de signaler :

1° Elles ont pour base la bougie internationale, nouvellement adoptée, il y a deux ans, par les Laboratoires nationaux d'Amérique, d'Angleterre et de France, et qui est pratiquement égale à la bougie Violle (c'est-à-dire au vingtième de l'étalon Violle), ou décimale.

2° L'unité de longueur adoptée est le centimètre, au lieu du mètre, de façon que les unités photométriques peuvent être considérées désormais comme partie intégrante du système C. G. S.

L'unité d'éclairement devient ainsi le « lumen par centimètre carré », c'est-à-dire le dix-millième de notre unité « lux »; l'emploi de celle-ci reste d'ailleurs autorisé à titre d'unité secondaire dans les pays employant le système métrique.

Sur la proposition de M. Blondel, l'étude de cette question et de l'adhésion à donner par la Société aux propositions américaines a été renvoyée à l'examen de la deuxième Section.

BIBLIOGRAPHIE.

Technologie électrique, par LE SOUHAITIER, Professeur à l'École normale professionnelle de Vierzon, préface de J. LEBOS, Inspecteur général de l'Enseignement technique, Directeur de l'École normale de l'enseignement technique. Paris, Ch. Delagrave, 15, rue Soufflot, 1911.

Ce Manuel a été rédigé à l'usage des élèves des écoles techniques du premier degré et des ouvriers-monteurs électriciens.

Il passe en revue les matières employées dans la construction et les installations électriques, l'outillage manuel et son emploi par le monteur et présente une quantité de notions sur les stations centrales, leur montage, la conduite des machines, les canalisations et l'appareillage.

L'Électricité et ses applications, par le Dr L. GRAETZ, Professeur à l'Université de Munich, traduit sur la 15^e édition allemande par Georges TARDY, Ingénieur-Conseil. Préface par H. LÉAUTÉ, Membre de l'Institut. 1 vol. grand in-8 de xx-640 pages avec 627 figures dans le texte. Paris, Masson et C^{ie}, éditeurs, 1911.

Nous possédons en France quelques bons volumes de vulgarisation de l'électricité; certains ont même été accueillis, comme ils le méritaient, par une vogue qui ne s'est pas encore ralentie. M. G. Tardy a été bien inspiré en nous faisant connaître, en une traduction non dépourvue d'élégance, l'Ouvrage similaire de M. le Dr L. Graetz dont le succès, en Allemagne, a été presque sans précédent.

L'Électricité et ses applications est un Ouvrage pratique par excellence; il s'adresse particulièrement aux débutants et aux praticiens qui désirent acquérir des notions indispensables à la connaissance d'un agent physique dont les manifestations sont si intimement liées à notre existence journalière et dont les applications sont si nombreuses, variées et fécondes.

Les divers Chapitres sont traités de telle sorte que chacun d'eux est presque complètement indépendant des autres.

C'est un véritable tour de force réalisé par l'auteur et un trait tout à fait caractéristique du plan qu'il a fort heureusement adopté.

Les turbines à vapeur (*Encyclopédie scientifique, Bibliothèque de Mécanique appliquée et Génie*), par M. F. CORDIER, Chef d'escadron à la Section technique de l'Artillerie, Ingénieur électricien, 1 volume in-18 jésus, cartonné toile, de 480 pages, avec 118 figures. Paris, O. Doin et fils.

La question des turbines à vapeur est si intimement liée aux applications électriques que l'apparition d'une étude sur ce sujet ne peut que retenir l'attention des électriciens.

A plus forte raison quand le sujet est traité par un ingénieur mécanicien doublé d'un électricien expérimenté tant en théorie qu'en pratique.

Ce sont ces particularités qui rendent très précieux l'Ouvrage de M. le Commandant Cordier.

On y trouvera les propriétés spéciales aux divers genres de turbines, la justification de leur emploi et les principes servant de base à leur construction; à signaler également les méthodes d'essai et la description des types pratiques.

Sous un format réduit, d'un prix des plus modiques, c'est un excellent traité bien présenté et qui, par sa valeur, fera honneur à la collection.

Leçons sur l'Électricité, par M. ERIC GÉRARD, 8^e édition entièrement refondue, de 2 volumes grand in-8 (25-16) se vendant séparément. — TOME I. *Théorie de l'Electricité et du Magnétisme, Electrométrie, Théorie et construction des générateurs électriques*; vol. de XII-975 pages avec 458 figures; 1910. — TOME II. *Transformateurs. Canalisation et distribution de l'énergie électrique. Application de l'électricité à la télégraphie, à la téléphonie, à l'éclairage, à la production et à la transmission de la puissance motrice, à la traction, à la Métallurgie et à la Chimie industrielle*; volume de VII-990 pages avec 489 figures; 1910. Librairie Gauthier-Villars.

Un Ouvrage qui a atteint sa huitième édition et qui émane de l'un des premiers Maîtres de l'Enseignement électrotechnique peut se passer de présentation.

Il suffit de signaler à l'attention des intéressés l'apparition des volumes éclos à nouveau et d'en rappeler les particularités et innovations.

A ce titre, l'exposé du magnétisme dans le Tome I fait ressortir la différence entre le flux de force et le flux d'induction.

A voir également le résumé des tendances et vues actuelles sur la constitution de la matière et les électrons.

Dans le Tome II, où les systèmes de transformation et de distribution de l'énergie électrique sont examinées, la question des transformateurs et des autres transformateurs a été notablement développée ainsi que celle de la protection des réseaux.

Les Chapitres relatifs à la télégraphie sans fil et à la traction ont été mis à jour.

Malgré les nombreux remaniements et les additions considérables que présente la 8^e édition, l'Editeur, avec le soin qui caractérise ses productions, a réussi, par le choix d'un papier spécial, à réduire l'encombrement des volumes tout en augmentant le nombre des pages de façon appréciable.

C'est une manière de faire à encourager pour le bien de nos bibliothèques modernes dont a valeur peut ainsi augmenter dans les mêmes limites de capacité.

Encyclopédie électrotechnique, par M. F. LOPPÉ, Ingénieur des Arts et Manufactures; Secrétaire. Librairie des Sciences et de l'Industrie, L. Geisler, Imprimeur éditeur, 1, rue de Médicis.

Pour être de création relativement récente, cette collection se distingue par sa fécondité et le choix de ses formules.

Nous avons à présenter pour cette fois, les 5^e et 48^e fascicules :

Induction et courants alternatifs, par M. Eug. Vigneron, Ingénieur conseil ;

Essais des machines à courants alternatifs par G. Ferroux, Ingénieur électricien, Professeur à l'Institut électrotechnique de l'Université de Grenoble.

M. Vigneron, qui a déjà fourni une contribution importante à l'*Encyclopédie électrotechnique*, traite, dans le 5^e fascicule, des généralités, de la théorie de l'induction et des courants alternatifs.

M. Ferroux, dans le 48^e fascicule, s'attache à la description des appareils de mesure spéciaux aux courants alternatifs, à l'étude magnétique de l'alternateur et aux essais des générateurs, transformateurs et moteurs d'induction des divers genres.



LISTE DES OUVRAGES

OFFERTS A LA SOCIÉTÉ INTERNATIONALE DES ÉLECTRICIENS •

(Suite.)

La Bibliothèque est ouverte aux Membres de la Société, tous les jours,
de 3 heures à 6 heures, excepté les dimanches et jours de fêtes,
12, rue de Staël.

France.

Électrochimie et Électrométallurgie à l'usage des ingénieurs électriciens.
Cours professé à l'École d'Électricité et de Mécanique industrielle de
Paris, par Henri VIGNERON. Paris, L. Jeisler, 1911; 1 vol. in-8°, broché.
(Don de l'éditeur.)

Ferro-magnétisme (Le). Applications industrielles, par R. JOUAUST. Paris,
Oct. Doin et fils, 1911; 1 vol. in-18 jésus, cartonné toile (*Encyclopédie
scientifique*). (Don des éditeurs.)

Formulaire de l'électricien et du mécanicien, par E. HOSPITALIER. 25^e édition
(1911), par Gaston ROUX. Paris. Masson et C^{ie}, 1911; 1 vol. in-16, cartonné
toile. (Don des éditeurs.)

*Manuel pratique du constructeur électricien. Construction des machines
électriques*, par G. PARDINI. Traduction d'après la seconde édition italienne
de Charles CARABINI, revue et corrigée par L. G. Paris, Bernard Tignol,
1911; 1 vol. in-16, cartonné toile (*Bibliothèque des Actualités industrielles*,
n° 149). (Don de l'éditeur.)

Étranger.

Association suisse des Électriciens et Union des Centrales suisses d'électri-
cité. *Statistique des installations électriques à courant fort*. Partie géné-
rale : *Stations centrales, Catégorie A* (année 1909). Zurich, Fachschriften
Verlag A. G., 1910; 1 vol. grand in-folio, cartonné. (Don du Secrétariat
de l'A. S. E.)

*Sur une nouvelle détermination de la force électromotrice de l'élément
Weston normal*, par R. de BAILLEHACHE. Genève, Société générale d'Impri-
merie, 1911; une brochure in-8° (Extrait des *Archives des Sciences physi-
ques et naturelles*). (Don de l'auteur.)

BULLETIN
DE LA
SOCIÉTÉ INTERNATIONALE
DES
ÉLECTRICIENS.

SOMMAIRE.

Compte rendu de la réunion mensuelle de mai 1911 : Admission de membres titulaires, p. 234. — Sur l'arc en vase clos, à propos de la Communication de M. Aliamet (Note de M. **Blondel**), p. 235. — Sur les théories électriques de la lumière et des mouvements mécaniques (M. **G. Lippmann**), p. 243. — Voltmètre électrostatique à lecture directe pour très haute tension, de MM. H. Abraham et P. Villard (M. **H. Abraham**), p. 247. — Sur les surintensités à la fermeture des circuits (M. **P. Bunet**), p. 253.

OUVRAGES OFFERTS, p. 282.

COMPTE RENDU

DE LA

RÉUNION ORDINAIRE MENSUELLE

du mercredi 3 mai 1911 ⁽¹⁾.

PRÉSIDENCE DE M. G. LIPPMANN.

La séance est ouverte à 8 h 40 m du soir.

Le procès-verbal de l'Assemblée générale et de la Réunion mensuelle du 5 avril 1911 est adopté.

⁽¹⁾ La Société n'est pas solidaire des opinions émises par ses Membres dans les discussions ni responsable des Notes ou Mémoires publiés dans le *Bulletin*.

A ce propos, M. le Secrétaire général donne lecture d'une Note de M. Blondel (*voir ci-après*, p. 235) relative à la Communication faite, au cours de la dernière séance, par M. Aliamet, sur une nouvelle lampe à arc en vase clos avec charbons minéralisés.

Il est donné connaissance des Ouvrages offerts à la Bibliothèque de la Société (*voir* p. 282) et des demandes d'admission suivantes :

Association amicale des anciens Élèves diplômés de l'Institut électrotechnique de l'Université de Lille, boulevard Carnot, à Lille (Nord). — Présenté par MM. Nègre et Swyngedauw.

Bauman (Jean), 20, rue Taitbout, à Paris. — Présenté par MM. Janet et Chaumat.

Bouvier (Henri-Joseph), Ingénieur E. C. P., constructeur, 53, rue du Polygone, à Grenoble (Isère). — Présenté par MM. Baillat et de Valbreuze.

Montandon (Arthur), Ingénieur, Chef d'exploitation à l'*Énergie électrique du Littoral méditerranéen*, 38 *bis*, Grand-Chemin de Toulon, à Marseille (Bouches-du-Rhône). — Présenté par MM. Bochet et de Valbreuze.

Ces candidats sont élus membres titulaires de la Société internationale des Électriciens.

L'ordre du jour appelle les Communications techniques.

SUR L'ARC EN VASE CLOS AVEC CHARBONS MINÉRALISÉS.

(Observations à propos de la Conférence de M. Aliamet.)

M. BLONDEL. — « M. Aliamet, en présentant, dans sa très intéressante Communication, la lampe à arc en vase clos Carbone-Bardon, a bien voulu rappeler que je m'étais occupé autrefois déjà du même problème.

» Il y a en effet déjà 10 ans que j'ai expérimenté et décrit ⁽¹⁾ le principe général d'une lampe à charbons minéralisés en vase clos, caractérisée par la combinaison d'un fumivore entouré d'une enveloppe de verre, évacuant par le haut les fumées dans des chambres de condensation (d'où elles redescendent par refroidissement naturel), et recevant par l'orifice inférieur les gaz purifiés.

» Depuis cette époque, j'ai construit plusieurs modifications de ces dispositifs, contenant des perfectionnements successifs destinés à améliorer la condensation des fumées, à activer la circulation des gaz et à les reconduire par tubes clos à l'ouverture inférieure de l'enveloppe protectrice. Les figures 1 et 2 représentent une de ces lampes munie de la circulation par tuyaux verticaux, déjà adoptée pour l'évacuation des fumées dans les lampes à l'air libre que j'ai décrites à la Société en 1908.

» Dans ce dispositif (qui est représenté pour charbons placés l'un au-dessus de l'autre, mais qui s'applique aussi au cas des lampes à charbons en V), la chambre de condensation C est placée au-dessus et en dehors du boisseau du mécanisme et reçoit les fumées provenant de l'arc par l'intermédiaire de deux tubes métalliques E qui traversent ce boisseau; les fumées se déposent pour la plus grande partie à l'intérieur de la boîte à fumée E au sortir du cône en verre D représenté par un trait pointillé; elles achèvent de se purifier dans la chambre C et redescendent par les

(¹) *Perfectionnement à l'arc électrique dans les lampes à arc. Brevet français, n° 914002, du 4 septembre 1901 (fig. 9).*

tubes S placés extérieurement et soumis à un refroidissement actif de l'air ambiant. Ces tubes S se prolongent, à l'intérieur du globe fermé G disposé à la manière ordinaire, par des raccords

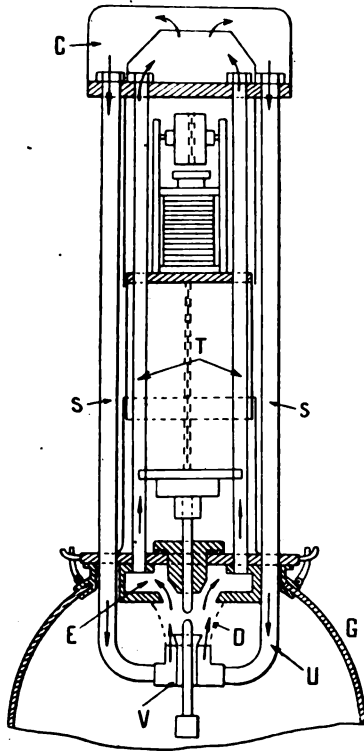


Fig. 1.

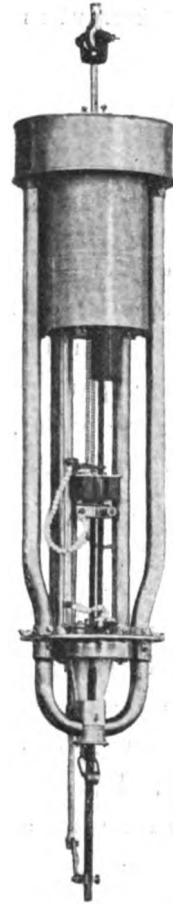


Fig. 2.

courbes U qui aboutissent à un tube annulaire V à travers lequel passe à frottement doux le charbon inférieur. Ce tube supporte l'enveloppe en verre ou en quartz mentionnée plus haut.

» L'expérience a montré qu'on réalise très facilement des durées de 80 à 120 heures et même davantage, suivant le diamètre des charbons, sans dépôt sensible dans la cheminée D; cela résulte, d'une part, de la rapidité du courant d'air qui traverse cette cheminée du haut en bas (et que des ailettes peuvent renvoyer contre les parois de la cheminée), et, d'autre part, du grand état

de pureté des gaz après leur passage dans les chambres E et C ⁽¹⁾.

» Comme on le voit, cette solution diffère notablement de celle décrite par M. Aliamet, et est un peu plus compliquée en apparence, mais elle conduit à des résultats équivalents et présente quelques avantages : plus grande étanchéité, puisqu'on emploie deux enceintes en verre au lieu d'une; plus grand refroidissement des gaz; nettoyage plus facile des chambres de condensation C.

» La question du rendement lumineux de l'arc enfermé est assez complexe; mais le résultat ne paraît pas faire exception à cette règle générale que toute diminution de l'usure des électrodes dans une lampe à arc réduit en même temps la quantité de lumière produite. On objecte, il est vrai, que la réduction de l'usure peut être ici compensée par une minéralisation plus forte des charbons, la scorification étant moins à redouter. Mais déjà on emploie pour les arcs ouverts des charbons dizones qui ne contiennent pas moins de 60 pour 100 de substances minérales dans leur partie utile, protégée extérieurement contre la scorification par une zone de charbon pur d'un volume à peu près égal; la minéralisation moyenne de l'ensemble atteint environ 30 pour 100. Il ne paraît pas possible, même dans un arc enfermé, de dépasser une minéralisation de plus de 60 pour 100 de la masse totale, c'est-à-dire le double du chiffre précédent; or, en vase clos, les électrodes s'usent quatre fois moins vite qu'à l'air (soit par exemple 5 mm par heure au lieu de 20 mm); la quantité de substances minérales fournie à l'arc en vase clos par unité de temps est donc finalement $\frac{3}{1} \times \frac{1}{4} = \frac{1}{2}$ de ce qu'elle est dans l'arc à l'air libre. Comme c'est la quantité de substances minérales vaporisées qui joue le rôle essentiel dans la production de la lumière, l'arc en vase clos ne peut donc pas réaliser un rendement lumineux égal à celui de l'arc minéralisé à l'air libre. Cette conclusion est encore renforcée par le fait que, à l'air libre, la combustion plus active du carbone incorporé aux substances minérales contribue à élever la température de ces dernières et par suite leur éclat. Enfin,

(1) La purification des gaz dans leur parcours est si complète que les courants U peuvent être supprimés; dans ce cas, l'enveloppe est supportée par un collier, à sa partie supérieure.

les électrodes employées en vase clos ont un diamètre plus fort et une taille plus droite, ce qui occulte davantage la lumière.

» Pour tous ces motifs, l'arc en vase clos ne peut guère donner, à consommation d'énergie égale, que 55 à 65 pour 100 de la lumière émise par l'arc à l'air libre, et encore supposons-nous ici que l'enveloppe de verre qui l'enferme reste complètement à l'abri des dépôts de fumées; on verra plus loin que cette hypothèse est trop optimiste.

» En fait, si l'on prend les résultats obtenus par le Laboratoire central sur les lampes à arc en vase clos Carbone-Bardon rapportés par M. Aliamet, on trouve une intensité moyenne hémisphérique de 762 bougies pour 365 watts, soit une consommation d'environ 0,48 watt par bougie, tandis qu'une lampe à arc carbo-minérale avec charbons dizones à 60 pour 100, comme on les fabrique aujourd'hui sans scories dangereuses, donne facilement, au même régime, 0,25 à 0,30 watt seulement par bougie d'après des résultats du même Laboratoire.

» Le rapport des rendements est à peu près le même dans le cas des courants alternatifs. Malgré les perfectionnements qui ont pu être apportés à la fabrication des charbons minéralisés homogènes, il est peu vraisemblable que ce rapport soit modifié dans la suite, car il tient aux causes qu'on vient d'énumérer plus haut, et qui sont d'ordre général.

» Ceux qui préconisent en ce moment l'arc en vase clos obéissent, il est vrai, à des préoccupations d'ordre économique très intéressantes : la diminution des frais d'achat des charbons et la diminution de la main-d'œuvre. Mais ces considérations n'ont qu'un intérêt tout relatif, important surtout dans les États-Unis et en Angleterre où la main-d'œuvre est très chère et l'électricité bon marché, mais bien moins net en France, où les conditions sont opposées.

» D'après les intéressants documents donnés par M. Aliamet, qui a comparé notamment les lampes Alba à l'air libre (exécutées d'après mon système) et les lampes en vase clos de M. Carbone pour courant alternatif, on trouverait que l'intensité lumineuse produite est la même avec 425 watts pour l'arc clos qu'avec 265 watts pour la lampe Alba; cette différence de consommation était encore plus grande si l'on employait, au lieu des charbons Alba, les charbons dizones de la Société Auer à lumière jaune,

qui donnent un rendement plus élevé. Cette différence de consommation entraîne une différence de prix de la fourniture de courant d'autant plus grande que le prix unitaire du kilowatt-heure est plus élevé. Elle varie de 13 marks pour du courant à 8 pfennigs (10 centimes) à 34 marks pour du courant à 15 pfennigs. A côté de cette différence, les frais de main-d'œuvre, qui s'élèvent seulement à 5 marks 50 pour 1000 heures pour la lampe Alba contre 1 mark pour la lampe en vase clos, paraissent bien négligeables.

» La différence est beaucoup plus grande sur le prix des charbons, mais reste du même ordre que celle du prix du courant et peut certainement être réduite, au moins en France, par l'emploi d'un seul charbon minéralisé au lieu de deux (c'est le cas du courant continu), et par le perfectionnement de la fabrication des charbons dizones, pour laquelle d'importants progrès ont été réalisés depuis deux ans. Même avec les prix indiqués dans le Tableau II de M. Aliamet, on voit qu'il y a presque égalité lorsque le courant ne coûte que 12 pfennigs, et que le type Alba devient franchement plus économique lorsque le kilowatt coûte 15 pfennigs (76 marks 70 contre 86 marks 35). Le prix de 15 pfennigs étant inférieur à celui de tous les Secteurs français, on voit que la lampe en vase clos ne présente, en France, d'intérêt que dans des cas spéciaux, par exemple pour les Compagnies de chemins de fer ou les Administrations qui fabriquent elles-mêmes leur courant à bon compte. Encore n'est-il pas certain que, dans ce cas, les avantages soient très sensibles, car le rendement attribué aux lampes à arc en vase clos me paraît jusqu'ici plutôt optimiste et ne paraît pas avoir été mesuré à la fin du fonctionnement, mais au commencement. Il semble que, si l'on tient compte du rendement moyen pendant la durée de la lampe, il ne doive pas dépasser sensiblement 50 pour 100 de celui d'une bonne lampe carbo-minérale. C'est, du reste, ce qu'admettent les ingénieurs américains qui ont fait des expériences comparatives sur différents types de lampes à arc ouvert et de lampes à arc enfermé. Il me paraît intéressant, à cette occasion, de citer l'opinion toute récente que vient de publier un ingénieur électricien américain bien connu, M. R. F. Pierce ⁽¹⁾ :

(¹) R. F. PIERCE. *Essential features of flame arc lamp design* (*The illuminating Engineer*, avril 1911, p. 82).

» La plus grande partie, dit M. Pierce, des tentatives récentes
» faites pour produire un arc à flamme de longue durée rentrent
» dans le système de l'arc en vase clos; celui-ci réduit le rendement
» d'environ 50 pour 100, mais il calme l'arc et permet l'usage d'un
» mécanisme plus rudimentaire. La difficulté consiste dans l'élimi-
» nation des dépôts minéraux provenant de l'arc. Seulement il faut
» avoir une chambre de condensation dans laquelle les gaz de la
» combustion soient complètement et continuellement refroidis
» jusqu'à une température qui assure le dépôt complet des oxydes
» solides et le refroidissement des gaz restants de telle sorte qu'ils
» puissent être réintroduits dans la chambre de combustion sans
» faire fendre le globe ni sans échauffer à l'excès les électrodes.
» Ce résultat est aisément obtenu tant que les chambres de conden-
» sation sont relativement propres, mais, après quelques mois
» d'emploi, les dépôts réduisent la capacité de refroidissement des
» parois de la chambre de condensation à un tel point que les oxydes
» solides ne sont plus déposés complètement, mais sont en-
» traînés de nouveau dans le globe et y produisent un dépôt qui
» réduit l'intensité lumineuse initiale jusqu'à 60 pour 100.

» Dans ces conditions, le rendement de l'arc enfermé peut tomber
» à une valeur aussi faible que 20 pour 100 du rendement de l'arc
» à flamme à l'air libre. D'autre part, les gaz, n'étant plus refroidis
» suffisamment, élèvent la température des électrodes à un tel degré
» que leur durée peut être réduite de 50 à 60 pour 100. Comme les
» dépôts de substance minérale s'agglutinent solidement, ils ne
» peuvent pas être enlevés par le nettoyage ordinaire. La seule
» manière possible d'obvier à cette difficulté semblerait être l'emploi
» d'une chambre de condensation à bon marché et amovible qui
» pourrait être enlevée moyennant une dépense insignifiante et
» remplacée en quelques minutes. D'autre part, il est très difficile
» de maintenir étanches les joints des enveloppes, qui empêchent
» l'accès de l'air; parce que les dépôts solides, à moins qu'on ne les
» enlève avec soin de toutes les surfaces des joints, empêcheront
» ces joints d'être complètement étanches ».

» Aux difficultés soulevées par M. Pierce, et qui, j'aime à le croire,
» sont mieux évitées dans les lampes Carbone que dans toutes
» celles réalisées jusqu'ici, je dois ajouter les suivantes : les vapeurs
» nitreuses et les fumées, dégagées par la combustion des arcs à

flamme, risquent d'autant plus d'abîmer les différentes parties du mécanisme qu'on ne les évacue pas au dehors au fur et à mesure de leur production.

» L'arc est plus long et moins stable que dans une lampe à arc ouvert; on a pu le voir par les artifices auxquels a recours M. Bardon pour obtenir une parfaite symétrie de la taille. Malgré cette symétrie, l'emploi des charbons de très gros diamètres qu'on est obligé d'adopter fait qu'en se déplaçant l'arc éclaire souvent d'une manière très inégale dans les différents azimuts.

» Enfin, et c'est là un des points les plus délicats des arcs en vase clos, l'usure des charbons est très variable suivant l'étanchéité du vase clos; si, par exemple, le globe n'est pas bien fermé ou s'il est fêlé au point de laisser un passage à l'air extérieur, la lampe arrive à fin de course bien avant la mesure prévue; en outre, s'il y a un accès d'air un peu trop fort, les charbons se mettent à scorifier. Ce dernier inconvénient est, il est vrai, complètement évité avec les charbons spéciaux dizones à enveloppe très mince en carbone pur que j'ai fait exécuter pour les arcs en vase clos; cette enveloppe évite toute scorification accidentelle et présente en outre l'avantage d'augmenter la conductibilité, mais elle n'empêche pas les inégalités de durée que je viens de signaler.

» En résumé, le rendement lumineux de l'arc en vase clos sera toujours considérablement inférieur à celui d'un arc ouvert de même consommation. Sans vouloir critiquer la solution très ingénieuse qui a été exposée à la Société, ni décourager les inventeurs, je crois, d'après ma modeste expérience, qu'il faut apporter une grande prudence dans l'emploi de ce système et qu'il faut en prévoir soigneusement les difficultés techniques en même temps que les avantages économiques, sensibles seulement lorsque le prix du kilowatt-heure est très bas.

**SUR LES THÉORIES ÉLECTRIQUES DE LA LUMIÈRE ET DES MOUVEMENTS
MÉCANIQUES (1).**

M. G. LIPPMANN. — « Messieurs, l'usage de notre Société veut que votre Président annuel inaugure ses fonctions par une Communication. J'aurais voulu pouvoir vous parler d'un de ces problèmes de Science appliquée où vous êtes hautement compétents; mais je n'aurais rien à vous apprendre en pareille matière. Il me faut donc me contenter de vous entretenir quelques instants de l'électricité à un point de vue plus abstrait, de l'influence que l'étude des phénomènes électriques a exercée sur d'autres portions de la Science.

» Il y a cent ans, on était dans l'ère des fluides; l'électricité était un fluide, ainsi que le calorique; la lumière une émanation subtile lancée par les corps; les fluides impondérables figurent dans les vieux Traités de Chimie à la suite des gaz pesants. Ensuite vient l'ère mécanique. La lumière s'explique mécaniquement par les vibrations d'un éther élastique; la chaleur est de la force vive moléculaire. Le succès de la théorie de Fresnel est éclatant; l'analogie du principe de l'équivalence avec le théorème des forces vives est évidente. Nul doute dès lors pour beaucoup de physiciens : tout phénomène doit avoir finalement une explication mécanique : l'incompatibilité du principe de Carnot avec la théorie mécanique est en général méconnue.

» Aujourd'hui, c'est l'ère de l'électricité qui a succédé à l'ère de la mécanique. Ce qui est curieux, et ce que je désire justement vous faire remarquer, c'est que cette extension des lois électriques à divers phénomènes n'a pas été cherchée *a priori*; elle s'est faite toute seule, en partant de l'étude quantitative, de la mesure des actions électriques. C'est ainsi que sont nées successivement et la théorie électromagnétique de la lumière, et la tentative hardie d'une mécanique nouvelle qu'on peut appeler *électromagnétique*.

(1) Durant cette Communication, le fauteuil de la présidence est occupé par M. D. Berthelot, vice-président.

» La théorie électromagnétique de la lumière est sortie des travaux faits sur les mesures électriques absolues. Vous savez que Gauss inventa la mesure absolue du champ magnétique; son élève Weber fit servir la mesure du champ magnétique à la mesure des courants; enfin Kirchhoff, l'illustre élève de Weber, compléta le cycle en mesurant les forces électromotrices en valeur absolue. Entre autres problèmes, Kirchhoff résout le suivant : qu'arrive-t-il quand l'équilibre a été troublé dans un fil conducteur qu'on abandonne ensuite à lui-même? Il arrive que la perturbation produite voyage le long du fil avec une vitesse déterminée v , laquelle se trouve numériquement égale à celle de la lumière. Le rapprochement ainsi suggéré entre l'onde électromagnétique et l'onde lumineuse fut poursuivi par Maxwell, qui l'étendit du fil conducteur à l'espace isolant. Ces idées d'ailleurs ont été fécondes : elles ont fait prévoir une relation qui existe réellement entre le pouvoir diélectrique des corps et leur indice de réfraction, entre leur opacité pour la lumière et la conductibilité électrique; elles ont fait comprendre pourquoi les métaux étant bons conducteurs doivent être opaques; comment un même corps, le sélénium, est isolant quand il est transparent, et opaque quand le recuit l'a rendu conducteur. Enfin cette même théorie a conduit à la découverte de l'action que le champ magnétique exerce sur l'émission lumière, c'est-à-dire du phénomène de Zeemann.

» Une autre extension de l'électricité est plus récente; c'est celle relative aux propriétés d'un corps électrisé en mouvement. Elle est née des tentatives pour trouver la loi des actions électromagnétiques d'un circuit ouvert. Si le circuit est ouvert, on ne peut y entretenir un courant qu'en transportant par convection de l'électricité d'une extrémité à l'autre du conduit métallique. Mais cette convection n'agit-elle pas sur l'aiguille aimantée à la façon d'un courant? Helmholtz a posé cette question, et la fit résoudre expérimentalement par Rowland. Comme l'on sait, Rowland démontra qu'un disque chargé électrostatiquement produit en tournant un champ magnétique. Ce phénomène doit avoir son inverse, qui est l'analogue de l'induction et de la self-induction : j'en ai fait la remarque dès 1879, et cette conclusion a

été vérifiée dans mon laboratoire par M. Vasilescu-Karpén. L'analogie de la *self*, dans le cas d'un point électrisé en mouvement, c'est une inertie apparente, d'origine électromagnétique, et qui tend à prolonger le mouvement quand la vitesse diminue. On lui a donné depuis le nom d'*inertie électromagnétique*.

» Quelques géomètres sont allés plus loin; ils ont remarqué qu'il y a de bonnes raisons pour attribuer aux molécules de tous les corps, même de ceux qu'on prend à l'état neutre, des charges statiques considérables, et ils se sont demandé si l'on ne devait pas expliquer par la *self* dont j'ai parlé plus haut même l'inertie du point matériel que l'on considère en Mécanique rationnelle. De là cette *Mécanique nouvelle* qui a suscité déjà plusieurs beaux travaux.

» Il sera bon, si l'on veut développer cette théorie, de tenir compte de l'observation suivante. Dans l'expérience de Rowland, qui sert de point de départ, le champ magnétique est dû à la vitesse *relative* des deux armatures de l'appareil. Quand cette vitesse varie, la réaction du champ électrique produit des forces qui sont appliquées à l'une et à l'autre armatures, et qui tend à maintenir constante non la vitesse de l'une d'entre elles, mais leur vitesse *relative*. Par là l'inertie électromagnétique se distingue notablement de l'inertie mécanique proprement dite.

» Ainsi l'on a tenté successivement d'expliquer la lumière par des phénomènes mécaniques, puis par des phénomènes électriques, et ensuite de ramener les phénomènes mécaniques à des actions électromagnétiques. Ces tentatives ont été fécondes en résultats divers comme on l'a vu, en lois qu'elles ont fait découvrir. Mais peuvent-elles aboutir à un résultat définitif? En d'autres termes le progrès consistera-t-il à simplifier la Science en réduisant le nombre des chapitres qui la constituent? Je me permets d'en douter. Le progrès de la Science fait partie de l'évolution de la vie, et toute évolution vitale a pour caractère de conduire à une complexité croissante de l'ensemble, en même temps qu'à une subordination de plus en plus parfaite de ses différentes parties.

» Je veux dire que le nombre des chapitres relatifs aux divers agents, tels que la lumière, l'électricité, n'ira pas en diminuant; le nombre des éléments des agents irréductibles ira peut-être en

augmentant, grâce à des découvertes nouvelles. Mais le nombre des relations connues, le rôle des mathématiques ira par contre en augmentant : la coordination, la simplification ne pourra se faire que sous cette forme mathématique. »

M. le PRÉSIDENT se fait l'interprète de l'Assemblée pour remercier M. Lippmann de l'intéressante Communication qu'il a bien voulu faire à la Société.

**VOLTMÈTRE ÉLECTROSTATIQUE A LECTURE DIRECTE POUR TRÈS HAUTE TENSION
DE MM. ABRAHAM ET VILLARD.**

M. H. ABRAHAM. — « Il semble, à première vue, que la réalisation d'un voltmètre électrostatique auquel il soit possible d'appliquer des tensions de 200 à 300 kilovolts doive présenter les plus grandes difficultés et conduire à des dimensions excessives.

» L'étude que nous poursuivons sur les décharges à haute tension nous a montré qu'un tel appareil peut, au contraire, être aisément réalisé avec des dimensions très acceptables. En raison même des tensions élevées mises en jeu, on dispose de forces relativement considérables qui permettent d'adopter, pour l'amplification des mouvements, des dispositifs mécaniques, grâce auxquels on obtient la lecture directe par déplacement d'une aiguille sur un cadran.

» L'instrument, très habilement construit sur nos indications par les Ateliers Carpentier (*fig. 1*), se présente sous la forme d'une boîte cylindrique d'une vingtaine de centimètres de diamètre, à angles fortement arrondis, portée par une haute colonne de verre. A l'intérieur de la boîte (*fig. 2*) une tige horizontale AA', suspendue par deux minces rubans d'acier RR', de manière à former parallélogramme articulé, constitue un pendule à translation dont le mouvement se transmet par bielle et manivelle à une aiguille I se déplaçant sur un cadran C, visible au travers d'une fenêtre. Ce mécanisme, entièrement métallique, étant placé dans une enceinte conductrice fermée à laquelle il est relié, se trouve protégé électriquement d'une manière parfaite.

» L'une des extrémités de la tige horizontale du pendule est pourvue d'un puissant amortisseur à air B; à l'autre extrémité se trouve l'organe soumis aux forces électriques. Cette pièce essentielle D est une capsule à bords droits, en aluminium embouti, dont le fond légèrement bombé, formant piston, affleure au niveau d'une ouverture pratiquée au milieu de la paroi cylindrique de la boîte.

» L'ensemble de la boîte et de la capsule d'aluminium constitue ainsi un conducteur unique dont une partie de la surface est mobile

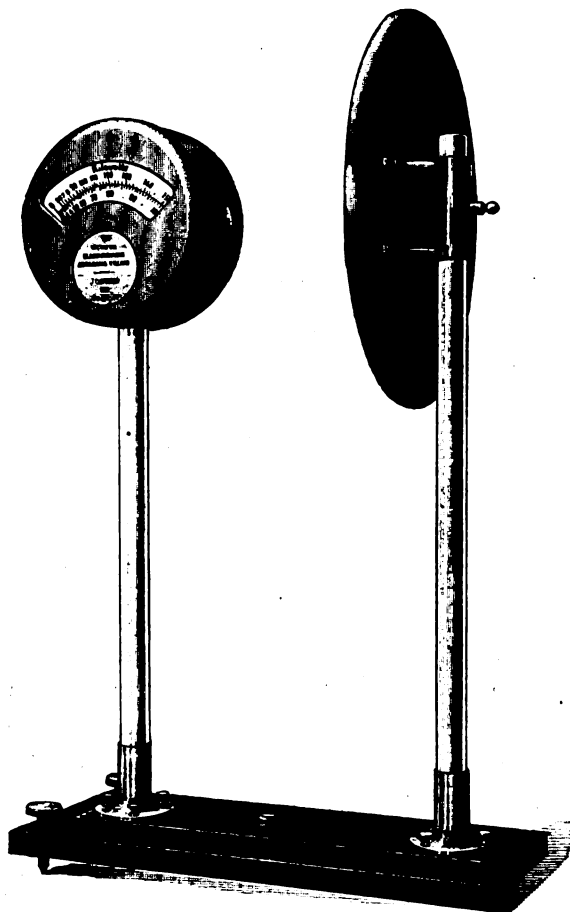


Fig. 1.

et transmet comme il est dit plus haut son mouvement à l'aiguille indicatrice.

» En face de la paroi mobile se trouve un large plateau attirant tenu verticalement par un support isolant. Suivant la distance à laquelle on fixe ce plateau, on peut donner au même appareil plusieurs sensibilités : un écartement de 10 à 20 cm convient pour des tensions ne dépassant pas 200 kilovolts.

» Le fonctionnement de l'appareil repose sur le même principe que celui de l'électromètre sphérique absolu de M. Lippmann. Dès qu'une différence de potentiel est appliquée au système formé par la boîte à paroi mobile et le plateau, une densité élec-

trique apparaît à la surface de ces conducteurs, et présente son maximum sur les faces en regard, en particulier sur la face externe de la capsule d'aluminium; le revers de celle-ci, faisant partie de la paroi intérieure de la boîte, ne présente au contraire aucune trace d'électrisation.

» Sous l'effort de la pression électrostatique produite par la couche électrique qui la recouvre, la capsule d'aluminium se dé-

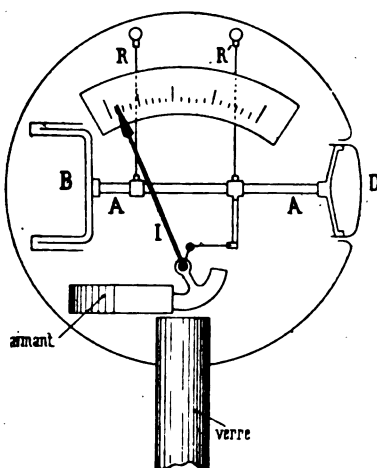


Fig. 2.

place vers le plateau, jusqu'à ce que la force antagoniste développée par la translation du pendule AA'RR' fasse équilibre à la force électrique.

» L'amortissement, tant du pendule AA', que de l'aiguille indicatrice, a été à dessein réglé à une valeur très supérieure à celle des instruments ordinaires, ampèremètres, voltmètres, etc., dits *apériodiques*, dans lesquels on laisse subsister une ou deux oscillations pour avoir un contrôle permanent de la mobilité du pivotage. L'appareil qui fait l'objet de cette description est en effet destiné surtout à des essais ou expériences (essais de câbles ou d'isolement de transformateurs, mesures de distances explosives, etc.) au cours desquels il arrivera très souvent que la tension sera ramenée brusquement à zéro, d'où un choc, dont la répétition fréquente pourrait fausser peu à peu les indications de l'appareil en en déplaçant le zéro. Pour cette raison, l'appareil est réglé à l'amortissement critique, ou un peu au delà.

» La distance qui sépare le plateau de la boîte électrométrique (20 cm pour 200 kilovolts) est largement suffisante pour des essais où l'on mesure une tension continue, et au cours desquels on n'a pas à craindre de surtensions accidentelles. Pour qu'une étincelle éclate entre des surfaces à grand rayon de courbure, entre sphères de 15 cm de diamètre par exemple, il faudrait les rapprocher jusqu'à 35,5 mm si la tension est de 100000 volts; et pour arriver à 20 cm d'étincelle on devrait élever la différence de potentiel jusqu'à près de 300000 volts.

» Il serait d'ailleurs facile d'augmenter beaucoup le coefficient de sécurité de l'instrument, comme il conviendrait de le faire s'il s'agissait de mesurer une tension alternative ou d'installer le voltmètre à demeure sur un réseau à haute tension. On serait alors conduit à doubler ou même à tripler la distance qui sépare le plateau de la boîte à paroi mobile; mais, comme la sensibilité diminue beaucoup moins vite que l'inverse de la distance, il suffirait de réduire un peu le poids de l'équipage mobile pour maintenir cette sensibilité à la valeur convenable. Les dimensions d'encombrement de l'instrument seraient seulement notablement augmentées.

» *Exactitude des indications de l'instrument.* — Il est évident que le voisinage immédiat d'objets extérieurs modifierait la force exercée sur la paroi mobile et fausserait les indications. Mais, en raison même des dangers que présente le maniement des hautes tensions, on est toujours conduit à ne rien laisser au voisinage de l'instrument et à effectuer les lectures à distance. Le plateau attirant est, par suite, le seul corps qui ait sur la pièce mobile une action appréciable : au point de vue de l'Électrostatique élémentaire, la force motrice est entièrement définie par la valeur de la différence de potentiel appliquée à l'instrument. Les indications données par celui-ci sont donc correctes et l'addition d'une cage protectrice serait manifestement superflue.

» Il en serait ainsi du moins dans le vide. Mais il ne faut pas oublier que l'expérience a lieu dans l'air. Aux très hautes tensions, sans même qu'il se produise aucune aigrette ou lueur appréciable, la densité électrique cubique de l'air n'est pas exactement nulle, la forme et la distribution des lignes de force ne sont pas définies

uniquement par la forme et la distance des conducteurs en présence, et les théorèmes élémentaires de l'Électrostatique cessent d'être rigoureusement applicables.

» L'expérience montre en effet que, pour les tensions élevées, on observe de légères variations dans les lectures quand on change le signe de la différence de potentiel, ou bien quand on relie au sol l'une ou l'autre des électrodes.

» Pour des mesures de précision, on peut rendre ces écarts insensibles en adaptant à la boîte du voltmètre un large anneau de garde entourant l'ouverture dans laquelle se déplace la capsule d'aluminium. L'instrument est alors symétrique et devient en même temps physiquement correct.

» *Sensibilité en fonction de la distance.* — Entre plateaux parallèles indéfinis, le champ produit par une différence de potentiel donnée varie exactement en raison inverse de la distance, et il en est de même de la densité électrique superficielle, égale (dans le vide ou dans l'air) au quotient du champ par 4π . La sensibilité d'un appareil où la paroi mobile appartiendrait à la surface de l'un de ces plateaux serait donc inversement proportionnelle à leur distance et, pour obtenir une déviation donnée, il faudrait, si l'on double la distance, doubler en même temps le voltage afin de conserver au champ la même valeur.

» Il en est tout autrement pour un système de conducteurs tel que celui de la figure 1, constitué par un corps de forme à peu près sphérique placé devant un plateau. La distribution électrique sur une sphère située en face d'un plan indéfini est la même que si ce plan était remplacé par la sphère symétrique, image électrique de la première par rapport au plan en question. Or la densité électrique sur un système de deux sphères portées à des potentiels différents varie beaucoup moins vite que l'inverse de leur distance et si l'on augmente celle-ci, depuis par exemple quatre fois le rayon des sphères, jusqu'à l'infini, la valeur du champ à la surface ne diminue que dans le rapport de 7 à 5 environ.

» Il résulte de là que, si l'étendue de l'échelle est de 100 kilovolts pour une distance de 10 cm entre le plateau et la boîte métallique, il suffira de 150 kilovolts environ pour faire parcourir à l'aiguille

toute la graduation quand on portera la distance à 20 cm. Si l'on veut que l'échelle entière comporte 200 kilovolts, on sera obligé, ou de modifier l'équipage mobile, ou d'augmenter encore l'écartement. On va voir que ce n'est pas là un inconvénient.

» *Voltmètre unipolaire.* — D'après ce qui vient d'être dit, la sensibilité de l'appareil diminue relativement peu lorsqu'on éloigne le plateau attirant. On peut donc, sans réduire beaucoup la sensibilité, remplacer l'action du plateau attirant par celle du sol, en ayant soin que celui-ci soit suffisamment éloigné pour que sa distance à l'appareil n'intervienne pas dans la distribution de l'électricité à la surface du voltmètre. Dans ces conditions, les déplacements de l'aiguille mesureront, bien entendu, le potentiel d'un conducteur par rapport au sol. L'instrument est réduit alors à la boîte à paroi mobile qu'on a soin de tenir à au moins 1 m de distance des objets environnants. La sensibilité reste largement suffisante pour des potentiels de l'ordre de 100 kilovolts, et ce voltmètre unipolaire, qui offre toute sécurité, convient particulièrement pour la mesure des tensions extrêmes de 200 à 300 kilovolts.»

M. le PRÉSIDENT remercie M. Abraham pour la présentation de ce nouvel appareil qui est appelé à rendre d'utiles services dans la pratique des courants à très haute tension.

SUR LES SURINTENSITÉS A LA FERMETURE DES CIRCUITS.

M. P. BUNET. — « 1. Quelques phénomènes de surintensité ont déjà fait l'objet de Communications à notre Société. En 1905, M. David présenta un certain nombre d'oscillogrammes relevés sur le réseau de l'Énergie électrique du Littoral méditerranéen. M. Johann fit, dans la même année, la publication d'un travail intéressant sur les surintensités des transformateurs. Tout dernièrement, M. Giles nous a dit quelques mots des surintensités dans les alternateurs en court-circuit.

» L'étude de ces phénomènes a déjà été traitée notamment par M. C.-P. Steinmetz dans son Livre sur les *Transient electric phenoma and oscillations*, dont l'édition française est actuellement à l'impression et duquel j'ai extrait quelques-unes des considérations que je vais exposer. J'ai l'intention de grouper dans cette Communication les faits déjà connus avec quelques idées et expériences personnelles. Je ne traiterai que le cas où les circuits possèdent résistance et inductance seulement, les capacités étant négligeables.

» 2. Si l'on ferme un circuit possédant une self-inductance L et une résistance r , comme une bobine sans fer sur une f. e. m. continue ou alternative, au bout d'un temps assez long, le courant aura pris une intensité de régime $i_{\text{permanent}}$.

» Mais le courant n'a pu passer de l'intensité nulle au moment de la fermeture à son régime définitif que par une transition, il y a là introduction de la *constante de temps* $\frac{r}{L}$, qui vient en exposant dans un terme exponentiel $e^{-\frac{r}{L}t}$.

» Dans le cas du courant continu, on sait que

$$i_t = i_{\text{permanent}} \left(1 - e^{-\frac{r}{L}t} \right).$$

» Ceci est représenté par la figure 1. L'intensité est portée en ordonnées. OX est l'axe des abscisses provisoires; $i_{\text{permanent}}$ est

une parallèle à cet axe. Traçons l'exponentielle $i_{\text{permanent}} \times e^{-\frac{r}{L}t}$. Nous prendrons cette courbe comme ligne définitive d'abscisses et nous

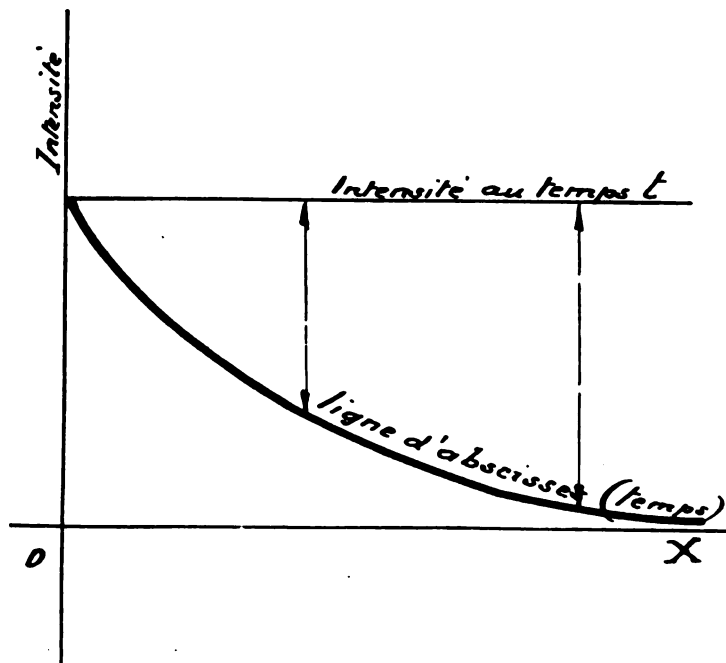


Fig. 1. — Établissement du courant continu.

obtiendrons la représentation du courant à chaque instant entre la ligne des abscisses (exponentielle) et la ligne représentant $i_{\text{permanent}}$.

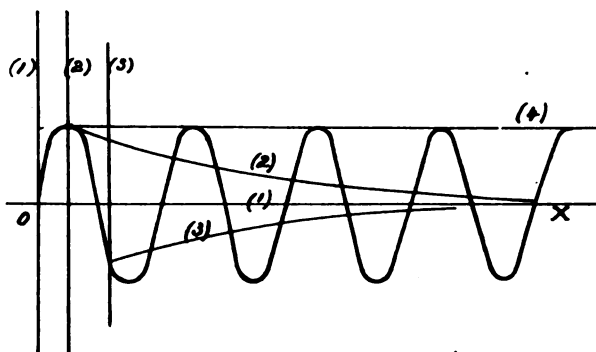


Fig. 2. — Établissement du courant alternatif.

» On démontre facilement qu'il en est de même en courant alternatif. Pour avoir l'intensité pendant la période transitoire, nous tracerons (fig. 2) la valeur de $i_{\text{permanent}}$ d'après les formules

connues; nous tracerons ensuite l'exponentielle $e^{-\frac{r}{L}t}$ en prenant comme échelle la valeur de $i_{\text{permanent}}$ pour $t = 0$. Ces courbes (1), (2), (3) seront prises comme lignes d'abscisses définitives respectivement, et nous aurons l'allure du courant en mesurant la distance entre elles et la courbe de $i_{\text{permanent}}$. Les lignes verticales (1), (2), (3) représentent les instants de la fermeture correspondant aux lignes d'abscisses (1), (2), (3). L'axe (1) se confond avec OX.

» Comme cas limite, si le coefficient de self-induction est énorme et la résistance faible, le terme $e^{-\frac{r}{L}t}$ se rapproche d'une parallèle à OX; et si l'on ferme, par exemple, au moment où $i_{\text{permanent}}$ serait maximum (4), la courbe représentant l'intensité reste toujours du même côté de l'axe des abscisses, autrement dit, le courant est redressé. En pratique, $\frac{r}{L}$ n'est jamais nul, mais le courant peut néanmoins rester en moyenne dans un sens donné

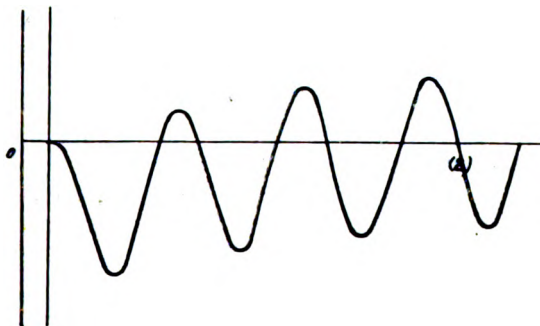


Fig. 3. — Etablissement du courant alternatif.

pendant fort longtemps, plusieurs secondes. On pourrait donc charger une batterie d'accumulateurs avec une f. e. m. alternative au moyen de fermetures et ouvertures synchroniques et successives d'un circuit inductif.

» L'intensité permanente étant décalée de presque 90° sur la f. e. m. appliquée si L est grand, on voit que la *fermeture aux environs du maximum de la f. e. m. ne produit pas de terme transitoire*; au contraire, ce terme existe et la *surintensité apparaît comme maximum égal à deux fois l'intensité permanente si la fermeture a lieu aux environs du passage à zéro de la f. e. m.*

» La théorie électromagnétique de la lumière est sortie des travaux faits sur les mesures électriques absolues. Vous savez que Gauss inventa la mesure absolue du champ magnétique; son élève Weber fit servir la mesure du champ magnétique à la mesure des courants; enfin Kirchhoff, l'illustre élève de Weber, compléta le cycle en mesurant les forces électromotrices en valeur absolue. Entre autres problèmes, Kirchhoff résout le suivant : qu'arrive-t-il quand l'équilibre a été troublé dans un fil conducteur qu'on abandonne ensuite à lui-même? Il arrive que la perturbation produite voyage le long du fil avec une vitesse déterminée v , laquelle se trouve numériquement égale à celle de la lumière. Le rapprochement ainsi suggéré entre l'onde électromagnétique et l'onde lumineuse fut poursuivi par Maxwell, qui l'étendit du fil conducteur à l'espace isolant. Ces idées d'ailleurs ont été fécondes : elles ont fait prévoir une relation qui existe réellement entre le pouvoir diélectrique des corps et leur indice de réfraction, entre leur opacité pour la lumière et la conductibilité électrique; elles ont fait comprendre pourquoi les métaux étant bons conducteurs doivent être opaques; comment un même corps, le sélénium, est isolant quand il est transparent, et opaque quand le recuit l'a rendu conducteur. Enfin cette même théorie a conduit à la découverte de l'action que le champ magnétique exerce sur l'émission lumière, c'est-à-dire du phénomène de Zeemann.

» Une autre extension de l'électricité est plus récente; c'est celle relative aux propriétés d'un corps électrisé en mouvement. Elle est née des tentatives pour trouver la loi des actions électromagnétiques d'un circuit ouvert. Si le circuit est ouvert, on ne peut y entretenir un courant qu'en transportant par convection de l'électricité d'une extrémité à l'autre du conduit métallique. Mais cette convection n'agit-elle pas sur l'aiguille aimantée à la façon d'un courant? Helmholtz a posé cette question, et la fit résoudre expérimentalement par Rowland. Comme l'on sait, Rowland démontra qu'un disque chargé électrostatiquement produit en tournant un champ magnétique. Ce phénomène doit avoir son inverse, qui est l'analogue de l'induction et de la self-induction : j'en ai fait la remarque dès 1879, et cette conclusion a

été vérifiée dans mon laboratoire par M. Vasilescu-Karpèn. L'analogie de la *self*, dans le cas d'un point électrisé en mouvement, c'est une inertie apparente, d'origine électromagnétique, et qui tend à prolonger le mouvement quand la vitesse diminue. On lui a donné depuis le nom d'*inertie électromagnétique*.

» Quelques géomètres sont allés plus loin; ils ont remarqué qu'il y a de bonnes raisons pour attribuer aux molécules de tous les corps, même de ceux qu'on prend à l'état neutre, des charges statiques considérables, et ils se sont demandé si l'on ne devait pas expliquer par la *self* dont j'ai parlé plus haut même l'inertie du point matériel que l'on considère en Mécanique rationnelle. De là cette *Mécanique nouvelle* qui a suscité déjà plusieurs beaux travaux.

» Il sera bon, si l'on veut développer cette théorie, de tenir compte de l'observation suivante. Dans l'expérience de Rowland, qui sert de point de départ, le champ magnétique est dû à la vitesse *relative* des deux armatures de l'appareil. Quand cette vitesse varie, la réaction du champ électrique produit des forces qui sont appliquées à l'une et à l'autre armatures, et qui tend à maintenir constante non la vitesse de l'une d'entre elles, mais leur vitesse *relative*. Par là l'inertie électromagnétique se distingue notablement de l'inertie mécanique proprement dite.

» Ainsi l'on a tenté successivement d'expliquer la lumière par des phénomènes mécaniques, puis par des phénomènes électriques, et ensuite de ramener les phénomènes mécaniques à des actions électromagnétiques. Ces tentatives ont été fécondes en résultats divers comme on l'a vu, en lois qu'elles ont fait découvrir. Mais peuvent-elles aboutir à un résultat définitif? En d'autres termes le progrès consistera-t-il à simplifier la Science en réduisant le nombre des chapitres qui la constituent? Je me permets d'en douter. Le progrès de la Science fait partie de l'évolution de la vie, et toute évolution vitale a pour caractère de conduire à une complexité croissante de l'ensemble, en même temps qu'à une subordination de plus en plus parfaite de ses différentes parties.

» Je veux dire que le nombre des chapitres relatifs aux divers agents, tels que la lumière, l'électricité, n'ira pas en diminuant; le nombre des éléments des agents irréductibles ira peut-être en

augmentant, grâce à des découvertes nouvelles. Mais le nombre des relations connues, le rôle des mathématiques ira par contre en augmentant : la coordination, la simplification ne pourra se faire que sous cette forme mathématique. »

M. le PRÉSIDENT se fait l'interprète de l'Assemblée pour remercier M. Lippmann de l'intéressante Communication qu'il a bien voulu faire à la Société.

**VOLTMÈTRE ÉLECTROSTATIQUE A LECTURE DIRECTE POUR TRÈS HAUTE TENSION
DE MM. ABRAHAM ET VILLARD.**

M. H. ABRAHAM. — « Il semble, à première vue, que la réalisation d'un voltmètre électrostatique auquel il soit possible d'appliquer des tensions de 200 à 300 kilovolts doive présenter les plus grandes difficultés et conduire à des dimensions excessives.

» L'étude que nous poursuivons sur les décharges à haute tension nous a montré qu'un tel appareil peut, au contraire, être aisément réalisé avec des dimensions très acceptables. En raison même des tensions élevées mises en jeu, on dispose de forces relativement considérables qui permettent d'adopter, pour l'amplification des mouvements, des dispositifs mécaniques, grâce auxquels on obtient la lecture directe par déplacement d'une aiguille sur un cadran.

» L'instrument, très habilement construit sur nos indications par les Ateliers Carpentier (*fig. 1*), se présente sous la forme d'une boîte cylindrique d'une vingtaine de centimètres de diamètre, à angles fortement arrondis, portée par une haute colonne de verre. A l'intérieur de la boîte (*fig. 2*) une tige horizontale AA', suspendue par deux minces rubans d'acier RR', de manière à former parallélogramme articulé, constitue un pendule à translation dont le mouvement se transmet par bielle et manivelle à une aiguille I se déplaçant sur un cadran C, visible au travers d'une fenêtre. Ce mécanisme, entièrement métallique, étant placé dans une enceinte conductrice fermée à laquelle il est relié, se trouve protégé électriquement d'une manière parfaite.

» L'une des extrémités de la tige horizontale du pendule est pourvue d'un puissant amortisseur à air B; à l'autre extrémité se trouve l'organe soumis aux forces électriques. Cette pièce essentielle D est une capsule à bords droits, en aluminium embouti, dont le fond légèrement bombé, formant piston, affleure au niveau d'une ouverture pratiquée au milieu de la paroi cylindrique de la boîte.

» L'ensemble de la boîte et de la capsule d'aluminium constitue ainsi un conducteur unique dont une partie de la surface est mobile

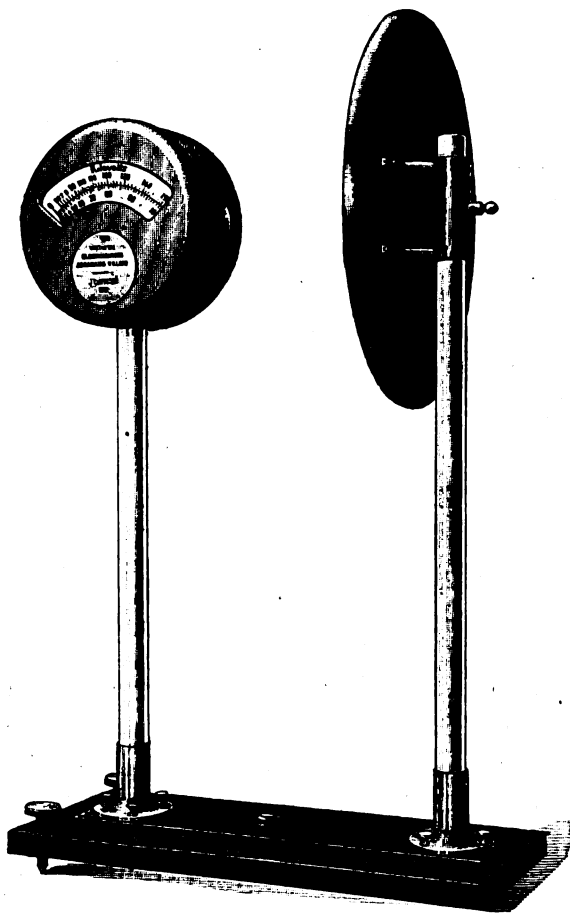


Fig. 1.

et transmet comme il est dit plus haut son mouvement à l'aiguille indicatrice.

» En face de la paroi mobile se trouve un large plateau attirant tenu verticalement par un support isolant. Suivant la distance à laquelle on fixe ce plateau, on peut donner au même appareil plusieurs sensibilités : un écartement de 10 à 20 cm convient pour des tensions ne dépassant pas 200 kilovolts.

» Le fonctionnement de l'appareil repose sur le même principe que celui de l'électromètre sphérique absolu de M. Lippmann. Dès qu'une différence de potentiel est appliquée au système formé par la boîte à paroi mobile et le plateau, une densité élec-

trique apparaît à la surface de ces conducteurs, et présente son maximum sur les faces en regard, en particulier sur la face externe de la capsule d'aluminium; le revers de celle-ci, faisant partie de la paroi intérieure de la boîte, ne présente au contraire aucune trace d'électrisation.

» Sous l'effort de la pression électrostatique produite par la couche électrique qui la recouvre, la capsule d'aluminium se dé-

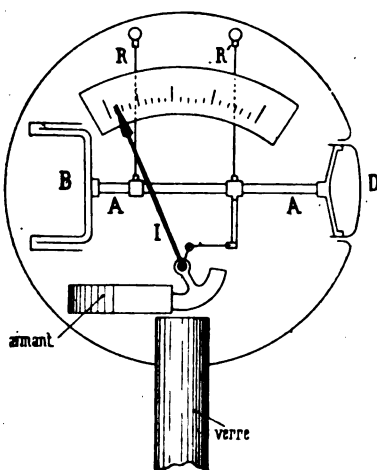


Fig. 2.

place vers le plateau, jusqu'à ce que la force antagoniste développée par la translation du pendule $AA'RR'$ fasse équilibre à la force électrique.

» L'amortissement, tant du pendule AA' , que de l'aiguille indicatrice, a été à dessein réglé à une valeur très supérieure à celle des instruments ordinaires, ampèremètres, voltmètres, etc., dits *apériodiques*, dans lesquels on laisse subsister une ou deux oscillations pour avoir un contrôle permanent de la mobilité du pivotage. L'appareil qui fait l'objet de cette description est en effet destiné surtout à des essais ou expériences (essais de câbles ou d'isolement de transformateurs, mesures de distances explosives, etc.) au cours desquels il arrivera très souvent que la tension sera ramenée brusquement à zéro, d'où un choc, dont la répétition fréquente pourrait fausser peu à peu les indications de l'appareil en en déplaçant le zéro. Pour cette raison, l'appareil est réglé à l'amortissement critique, ou un peu au delà.

» La distance qui sépare le plateau de la boîte électrométrique (20 cm pour 200 kilovolts) est largement suffisante pour des essais où l'on mesure une tension continue, et au cours desquels on n'a pas à craindre de surtensions accidentelles. Pour qu'une étincelle éclate entre des surfaces à grand rayon de courbure, entre sphères de 15 cm de diamètre par exemple, il faudrait les rapprocher jusqu'à 35,5 mm si la tension est de 100 000 volts : et pour arriver à 20 cm d'étincelle on devrait élever la différence de potentiel jusqu'à près de 300 000 volts.

» Il serait d'ailleurs facile d'augmenter beaucoup le coefficient de sécurité de l'instrument, comme il conviendrait de le faire s'il s'agissait de mesurer une tension alternative ou d'installer le voltmètre à demeure sur un réseau à haute tension. On serait alors conduit à doubler ou même à tripler la distance qui sépare le plateau de la boîte à paroi mobile ; mais, comme la sensibilité diminue beaucoup moins vite que l'inverse de la distance, il suffirait de réduire un peu le poids de l'équipage mobile pour maintenir cette sensibilité à la valeur convenable. Les dimensions d'encombrement de l'instrument seraient seulement notablement augmentées.

» *Exactitude des indications de l'instrument.* — Il est évident que le voisinage immédiat d'objets extérieurs modifierait la force exercée sur la paroi mobile et fausserait les indications. Mais, en raison même des dangers que présente le maniement des hautes tensions, on est toujours conduit à ne rien laisser au voisinage de l'instrument et à effectuer les lectures à distance. Le plateau attirant est, par suite, le seul corps qui ait sur la pièce mobile une action appréciable : au point de vue de l'Électrostatique élémentaire, la force motrice est entièrement définie par la valeur de la différence de potentiel appliquée à l'instrument. Les indications données par celui-ci sont donc correctes et l'addition d'une cage protectrice serait manifestement superflue.

» Il en serait ainsi du moins dans le vide. Mais il ne faut pas oublier que l'expérience a lieu dans l'air. Aux très hautes tensions, sans même qu'il se produise aucune aigrette ou lueur appréciable, la densité électrique cubique de l'air n'est pas exactement nulle, la forme et la distribution des lignes de force ne sont pas définies

uniquement par la forme et la distance des conducteurs en présence, et les théorèmes élémentaires de l'Électrostatique cessent d'être rigoureusement applicables.

» L'expérience montre en effet que, pour les tensions élevées, on observe de légères variations dans les lectures quand on change le signe de la différence de potentiel, ou bien quand on relie au sol l'une ou l'autre des électrodes.

» Pour des mesures de précision, on peut rendre ces écarts insensibles en adaptant à la boîte du voltmètre un large anneau de garde entourant l'ouverture dans laquelle se déplace la capsule d'aluminium. L'instrument est alors symétrique et devient en même temps physiquement correct.

» *Sensibilité en fonction de la distance.* — Entre plateaux parallèles indéfinis, le champ produit par une différence de potentiel donnée varie exactement en raison inverse de la distance, et il en est de même de la densité électrique superficielle, égale (dans le vide ou dans l'air) au quotient du champ par 4π . La sensibilité d'un appareil où la paroi mobile appartiendrait à la surface de l'un de ces plateaux serait donc inversement proportionnelle à leur distance et, pour obtenir une déviation donnée, il faudrait, si l'on double la distance, doubler en même temps le voltage afin de conserver au champ la même valeur.

» Il en est tout autrement pour un système de conducteurs tel que celui de la figure 1, constitué par un corps de forme à peu près sphérique placé devant un plateau. La distribution électrique sur une sphère située en face d'un plan indéfini est la même que si ce plan était remplacé par la sphère symétrique, image électrique de la première par rapport au plan en question. Or la densité électrique sur un système de deux sphères portées à des potentiels différents varie beaucoup moins vite que l'inverse de leur distance et si l'on augmente celle-ci, depuis par exemple quatre fois le rayon des sphères, jusqu'à l'infini, la valeur du champ à la surface ne diminue que dans le rapport de 7 à 5 environ.

» Il résulte de là que, si l'étendue de l'échelle est de 100 kilovolts pour une distance de 10 cm entre le plateau et la boîte métallique, il suffira de 150 kilovolts environ pour faire parcourir à l'aiguille

toute la graduation quand on portera la distance à 20 cm. Si l'on veut que l'échelle entière comporte 200 kilovolts, on sera obligé, ou de modifier l'équipage mobile, ou d'augmenter encore l'écartement. On va voir que ce n'est pas là un inconvénient.

» *Voltmètre unipolaire.* — D'après ce qui vient d'être dit, la sensibilité de l'appareil diminue relativement peu lorsqu'on éloigne le plateau attirant. On peut donc, sans réduire beaucoup la sensibilité, remplacer l'action du plateau attirant par celle du sol, en ayant soin que celui-ci soit suffisamment éloigné pour que sa distance à l'appareil n'intervienne pas dans la distribution de l'électricité à la surface du voltmètre. Dans ces conditions, les déplacements de l'aiguille mesureront, bien entendu, le potentiel d'un conducteur par rapport au sol. L'instrument est réduit alors à la boîte à paroi mobile qu'on a soin de tenir à au moins 1 m de distance des objets environnants. La sensibilité reste largement suffisante pour des potentiels de l'ordre de 100 kilovolts, et ce voltmètre unipolaire, qui offre toute sécurité, convient particulièrement pour la mesure des tensions extrêmes de 200 à 300 kilovolts.»

M. le PRÉSIDENT remercie M. Abraham pour la présentation de ce nouvel appareil qui est appelé à rendre d'utiles services dans la pratique des courants à très haute tension.

SUR LES SURINTENSITÉS A LA FERMETURE DES CIRCUITS.

M. P. BUNET. — « 1. Quelques phénomènes de surintensité ont déjà fait l'objet de Communications à notre Société. En 1905, M. David présenta un certain nombre d'oscillogrammes relevés sur le réseau de l'Énergie électrique du Littoral méditerranéen. M. Johann fit, dans la même année, la publication d'un travail intéressant sur les surintensités des transformateurs. Tout dernièrement, M. Giles nous a dit quelques mots des surintensités dans les alternateurs en court-circuit.

» L'étude de ces phénomènes a déjà été traitée notamment par M. C.-P. Steinmetz dans son Livre sur les *Transient electric phenoma and oscillations*, dont l'édition française est actuellement à l'impression et duquel j'ai extrait quelques-unes des considérations que je vais exposer. J'ai l'intention de grouper dans cette Communication les faits déjà connus avec quelques idées et expériences personnelles. Je ne traiterai que le cas où les circuits possèdent résistance et inductance seulement, les capacités étant négligeables.

» 2. Si l'on ferme un circuit possédant une self-inductance L et une résistance r , comme une bobine sans fer sur une f. e. m. continue ou alternative, au bout d'un temps assez long, le courant aura pris une intensité de régime $i_{\text{permanent}}$.

» Mais le courant n'a pu passer de l'intensité nulle au moment de la fermeture à son régime définitif que par une transition, il y a là introduction de la *constante de temps* $\frac{r}{L}$, qui vient en exposant dans un terme exponentiel $e^{-\frac{r}{L}t}$.

» Dans le cas du courant continu, on sait que

$$i_t = i_{\text{permanent}} \left(1 - e^{-\frac{r}{L}t} \right).$$

» Ceci est représenté par la figure 1. L'intensité est portée en ordonnées. OX est l'axe des abscisses provisoires; $i_{\text{permanent}}$ est

une parallèle à cet axe. Traçons l'exponentielle $i_{\text{permanent}} \times e^{-\frac{R}{L}t}$. Nous prendrons cette courbe comme ligne définitive d'abscisses et nous

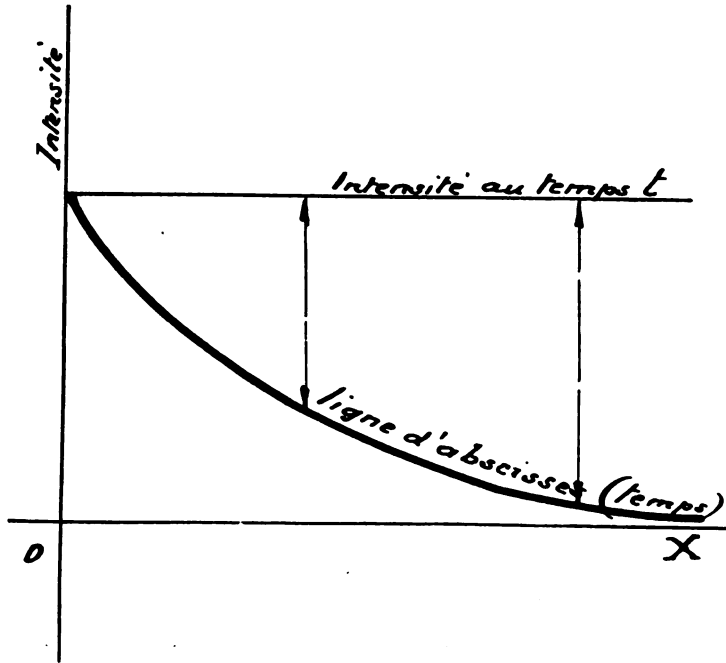


Fig. 1. — Établissement du courant continu.

obtiendrons la représentation du courant à chaque instant entre la ligne des abscisses (exponentielle) et la ligne représentant $i_{\text{permanent}}$.

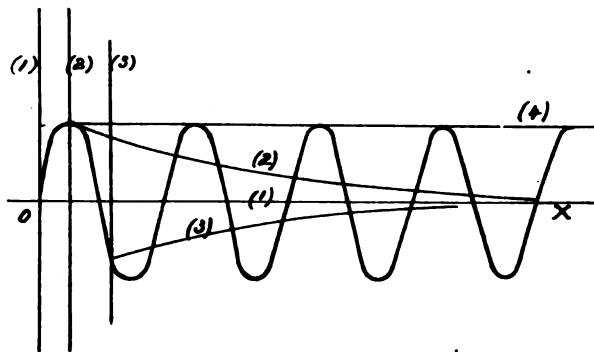


Fig. 2. — Établissement du courant alternatif.

» On démontre facilement qu'il en est de même en courant alternatif. Pour avoir l'intensité pendant la période transitoire, nous tracerons (fig. 2) la valeur de $i_{\text{permanent}}$ d'après les formules

connues; nous tracerons ensuite l'exponentielle $e^{-\frac{r}{L}t}$ en prenant comme échelle la valeur de $i_{\text{permanent}}$ pour $t = 0$. Ces courbes (1), (2), (3) seront prises comme lignes d'abscisses définitives respectivement, et nous aurons l'allure du courant en mesurant la distance entre elles et la courbe de $i_{\text{permanent}}$. Les lignes verticales (1), (2), (3) représentent les instants de la fermeture correspondant aux lignes d'abscisses (1), (2), (3). L'axe (1) se confond avec OX.

» Comme cas limite, si le coefficient de self-induction est énorme et la résistance faible, le terme $e^{-\frac{r}{L}t}$ se rapproche d'une parallèle à OX; et si l'on ferme, par exemple, au moment où $i_{\text{permanent}}$ serait maximum (4), la courbe représentant l'intensité reste toujours du même côté de l'axe des abscisses, autrement dit, le courant est redressé. En pratique, $\frac{r}{L}$ n'est jamais nul, mais le courant peut néanmoins rester en moyenne dans un sens donné

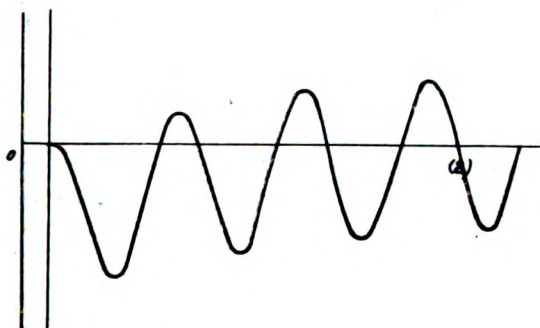


Fig. 3. — Établissement du courant alternatif.

pendant fort longtemps, plusieurs secondes. On pourrait donc charger une batterie d'accumulateurs avec une f. e. m. alternative au moyen de fermetures et ouvertures synchroniques et successives d'un circuit inductif.

» L'intensité permanente étant décalée de presque 90° sur la f. e. m. appliquée si L est grand, on voit que la *fermeture aux environs du maximum de la f. e. m. ne produit pas de terme transitoire*; au contraire, ce terme existe et la *surintensité apparaît comme maximum égal à deux fois l'intensité permanente si la fermeture a lieu aux environs du passage à zéro de la f. e. m.*

2. Soit $E \sin(\omega t + \chi)$ la tension d'alimentation, i le courant au temps t ,

$$(1) \quad E \sin(\omega t + \chi) - ri - L \frac{di}{dt} = 0;$$

d'où

$$(2) \quad i = \frac{E}{\sqrt{r^2 + L^2 \omega^2}} \sin(\omega t + \chi - \varphi) + A e^{at}$$

avec

$$(3) \quad \tan \varphi = \omega \frac{L}{r}.$$

En portant (2) en (1), on tire

$$(4) \quad a = -\frac{r}{L}.$$

Si pour $t = 0$, $i_0 = 0$ on a

$$(5) \quad A = -\frac{E}{\sqrt{r^2 + L^2 \omega^2}} \sin(\chi - \varphi);$$

d'où, pour la valeur du courant i ,

$$(6) \quad i = \frac{E}{\sqrt{r^2 + L^2 \omega^2}} \left[\sin(\omega t + \chi - \varphi) - \sin(\chi - \varphi) e^{-\frac{r}{L} t} \right].$$

Si l'on ferme quand $i_{\text{permanent}} = 0$, on a $\chi - \varphi = 0$; le terme transitoire est nul.

Si l'on ferme quand $i_{\text{permanent}}$ est maximum $\chi - \varphi = \frac{\pi}{2}$, $\sin(\chi - \varphi) = 1$, et le terme transitoire est maximum.

Si l'on ferme à un instant intermédiaire, on a une valeur réduite de ce terme transitoire.

D'une manière générale le coefficient du terme exponentiel est égal à la valeur permanente que le courant posséderait à la fermeture, s'il s'établissait instantanément.

» 3. L'explication physique est très simple. Lorsqu'une différence de potentiel est appliquée à un circuit, il faut, en négligeant la résistance, que le circuit soit le siège d'une f. e. m. égale et opposée; cette f. e. m. est proportionnelle au taux de variation du flux dans le circuit.

» Quand la différence de potentiel passe par zéro, que ce soit en régime variable ou permanent, le flux a une certaine valeur Φ ; la différence de potentiel augmentant en valeur absolue, Φ doit varier de telle sorte que la f. e. m. soit créée.

» En régime permanent, soit Φ_{max} la valeur maximum du flux. Quand la f. e. m. passe par zéro, le flux est $+\Phi_{\text{max}}$; la f. e. m. augmente, Φ diminue; la f. e. m. devient maximum, Φ s'annule; la f. e. m. diminue, Φ change de signe, et quand la f. e. m. est

redevvenue nulle, le flux est devenu $-\Phi_{\max}$. Donc, entre deux passages par zéro de la différence de potentiel appliquée, il y a une variation de flux égale à $2\Phi_{\max}$.

» Au moment de la fermeture du circuit, le flux ne s'établit pas instantanément; il doit donc prendre des valeurs transitoires; mais il est nécessaire que les variations de flux soient les mêmes qu'en régime pour contrebalancer la différence de potentiel appliquée, soit $2\Phi_{\max}$ entre deux passages à zéro de cette différence de potentiel.

» Si l'on ferme le circuit au moment précis où la différence de potentiel est nulle, à ce moment le courant est nul, donc le flux aussi $\Phi = 0$; mais, comme il faut toujours que la variation de ce flux contrebalance la différence de potentiel appliquée, le flux devra donc suivre une loi telle qu'après une demi-période il ait une variation $2\Phi_{\max}$. Il a donc atteint la valeur $2\Phi_{\max}$, puisqu'il part de zéro; et, si le coefficient de self-induction est constant, le courant a doublé d'intensité.

» Dans la deuxième demi-période, on doit avoir une variation de flux $-2\Phi_{\max}$, ce qui ramène le flux et le courant absorbé à zéro, après une période complète; et ainsi de suite, le flux et par suite le courant restant toujours de même sens.

» Si la résistance du circuit n'est pas nulle, ce qui est toujours le cas, la f. e. m. ne sera pas juste égale à la différence de potentiel appliquée, mais en différera de ri ; par conséquent, au lieu d'avoir une variation $2\Phi_{\max}$, on aura $2\Phi_{\max} - \varepsilon$ à cause de l'accroissement de i ; le flux maximum, au bout d'une demi-période, ne montera donc qu'à $2\Phi_{\max} - \varepsilon$. Dans la deuxième demi-période, la différence de potentiel partira de zéro avec un flux $2\Phi_{\max} - \varepsilon$ et reviendra à zéro, ce qui exigera une variation plus grande que $2\Phi_{\max}$, puisque le courant ne s'est pas inversé. On voit, sur la figure 4, que, dans la première demi-période, la différence de potentiel et le courant sont tous deux au-dessus de l'axe des abscisses; dans la seconde, l'un est au-dessus, l'autre au-dessous. Il faut donc une f. e. m. plus grande que la différence de potentiel appliquée, ce qui exige une variation $2\Phi_{\max} + \varepsilon'$. Au bout d'une période complète, le flux est donc inverse et égal à $\varepsilon + \varepsilon'$. Dans la troisième demi-période, on montera moins haut que dans

la première puisqu'au lieu de partir de zéro on part d'une valeur inférieure et que la variation totale est de nouveau légèrement inférieure à $2\Phi_{\max}$.

» Et ainsi de suite jusqu'à rejoindre la courbe permanente.

» Si l'on fermait, au contraire, toujours avec r nul, au moment où la différence de potentiel passe au maximum, le flux serait nul puisque le courant qui le crée est nul. Mais c'est précisément la condition de régime. Aussi le flux et, par suite, le courant

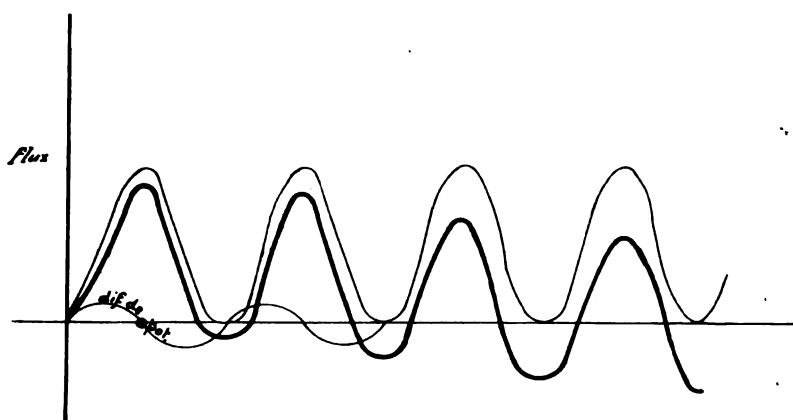


Fig. 4. — Établissement du courant alternatif.

prennent-ils tout de suite la courbe définitive, car elle satisfait immédiatement aux conditions imposées.

» 4. *Bobine de self avec fer, ou transformateur à vide.* — Dans ce cas, le coefficient L n'est plus constant car la perméabilité du noyau varie avec la force magnétisante; de plus, à cause de l'hystérésis la valeur du flux n'est même pas constante pour un même nombre d'ampère-tours. Négligeons d'abord cette dernière condition et ne nous occupons que de la perméabilité.

» Si nous fermons le circuit au moment où la valeur permanente aurait passé par zéro, c'est-à-dire où la différence de potentiel est à peu près maximum, le courant magnétisant absorbé suit exactement la courbe permanente dès la fermeture, car il lui est possible de s'y adapter immédiatement. A cause de la variation de perméabilité ce courant n'est pas sinusoïdal.

» Si nous fermons le circuit au moment où la valeur permanente aurait été maximum, soit au zéro de la différence de poten-

tentiel, nous devons atteindre comme précédemment double flux au bout d'une demi-période, à part la chute de tension dans l'enroulement; puis, au bout d'une période, le flux revient presque à zéro; au bout d'une période et demie, il est de nouveau presque double, et ainsi de suite.

» Mais, à cause de la saturation, le double flux ne peut être obtenu que moyennant un courant magnétisant fort intense, représentant un grand nombre de fois le courant normal; l'allure

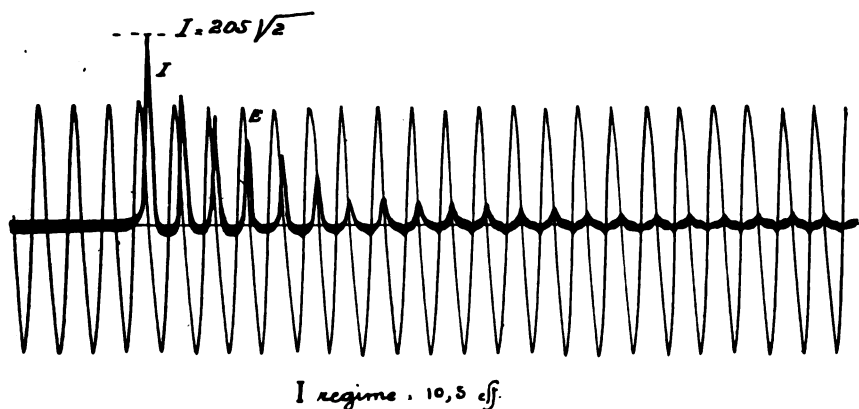


Fig. 5. — Transformateur à vide (oscillogramme).

du phénomène devient celle de la figure 5, qui est un oscillogramme relevé sur un transformateur ayant les constantes suivantes :

» Tension primaire : 115 volts eff. appliqués à 62 spires, à la fréquence 25. Section constante de fer : 162 cm^2 . Induction correspondante : 10300. Intensité normale à vide 10,5 amp.

» Comme on le voit, l'intensité absorbée atteint 20 fois l'intensité de régime; l'amortissement est très faible, et, après plusieurs secondes, le régime n'est quelquefois pas encore établi.

» Si nous considérons maintenant l'hystérésis, nous voyons, d'après le cycle de la figure 6, que nous aurons une certaine aimantation rémanente correspondant à Oa et Ob représentant l'aimantation du fer, quand l'intensité est nulle dans l'enroulement, soit un flux $\pm \Phi_r$. Nous aurons toujours à créer dans la première demi-période une variation $2\Phi_{\text{max}}$; le flux pourra donc monter au maximum à $2\Phi_{\text{max}} + \Phi_r$, si la fermeture a lieu aux environs de la différence de potentiel nulle et si l'aimantation rémanente est en sens défavorable.

» Il est assez facile, quoique un peu long, de tracer à l'avance la courbe de surintensité maximum; on néglige d'abord la ré-

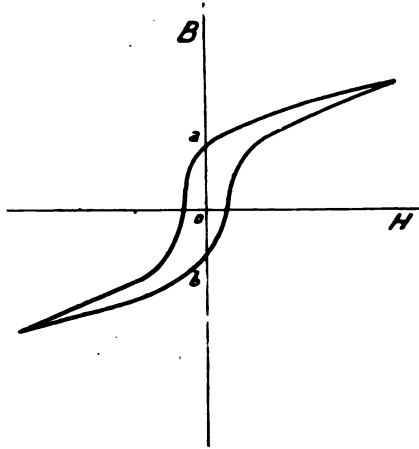


Fig. 6. — Cycle d'hystérésis.

sistance et l'on trace la courbe représentant le flux, tout entière d'un même côté de l'axe des temps; puis, au moyen de la figure 6, on passe à la courbe (1) d'intensité (fig. 7). Pour chacun des points

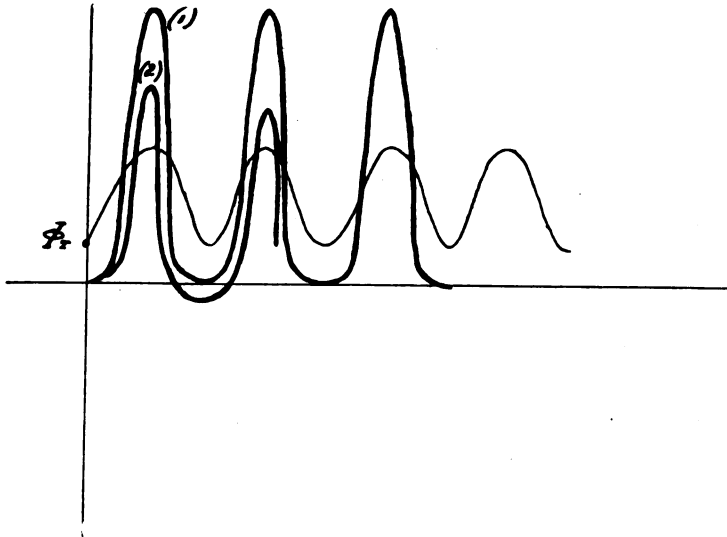


Fig. 7. — Tracé de la courbe de surintensité maximum.

on pourra déduire de la f. e. m. la chute ri et tenir compte de la portion du flux qui ne traverse pas le fer, ce qui amènera à la courbe d'intensité (2). Celle-ci représentera une deuxième approxi-

mation donnant des valeurs trop faibles, car on a supposé des intensités trop considérables. La courbe véritable sera donc entre les deux; on s'en approchera autant qu'on désirera par approximations successives.

» On voit donc que la surintensité à la fermeture des transformateurs peut être considérable. Dans les réseaux où la fréquence atteint et dépasse 50, l'induction est généralement faible, de l'ordre de 8000 avec les anciennes qualités de tôles, ce qui exige une f. m. m. normale de 2, 5 a. t. : cm. Si l'induction rémanente est de 2500, on pourrait monter à $(2 \times 8000) + 2500 = 18500$, s'il n'y avait pas de résistance. Cela se réduit en pratique à 16000, par exemple, avec 32 at. : cm; le courant est donc au maximum $\frac{32}{2,5} = 12,8$ fois l'intensité de régime, ce qui est assez faible et n'atteint qu'à peine l'intensité de pleine charge.

» Mais, dans les réseaux à 25 périodes et au-dessous, ou même dans ceux à 50 où l'on a des tôles au silicium, comme on le fait presque toujours actuellement, l'induction maximum atteint quelquefois 14000 et 15000. Si l'induction maximum est de 14000 et l'induction rémanente de 2000, on monterait, sans les chutes de tension, à 30000 dans les conditions extrêmes. Avec des valeurs de cet ordre, il passera une portion fort appréciable du flux en suivant un chemin plus ou moins dans l'air, et le fer aura, en réalité, une induction beaucoup moindre, les chutes *ri* devenant importantes aussi. Mais pour 14000 il faut 11,5 a. t. : cm; et pour 21000 seulement il en faut 450, soit 40 fois plus. On pourra faire le calcul approximatif, dans chaque cas particulier.

» Ces surintensités pourront déterminer des déplacements de conducteurs, si les transformateurs ne sont pas établis assez solidement; il faudra aussi avoir des disjoncteurs suffisamment différés pour ne pas avoir d'interruption par suite de la manœuvre normale de la fermeture; la surintensité est de trop courte durée pour constituer une gêne appréciable pour le réseau.

» Les surintensités ne se produisent pas à chaque fermeture; elles n'ont lieu que si l'on ferme au moment où la différence de potentiel du réseau est assez éloignée de son maximum. Par conséquent, on aura, en pratique, une certaine proportion de ferme-

tures presque sans surintensité, une autre avec surintensités moyennes, une autre avec surintensités fortes. Pour avoir une idée de cette proportion, qu'on pourrait d'ailleurs déterminer approximativement par le calcul, on peut tirer des oscillogrammes, sans mettre en mouvement le rouleau de l'appareil; chaque oscillogramme se réduit alors à une ligne donnant la valeur maximum du courant; on fait ensuite légèrement tourner le cylindre et l'on recommence une nouvelle expérience, etc.

» L'oscillogramme de la figure 8 a été ainsi relevé sur un trans-



Fig. 8. — Oscillogramme montrant une série de fermetures d'un transformateur.

formateur ayant les constantes suivantes : tension primaire 290 volts efficaces appliquées à 60 spires sous 25 périodes; section du noyau 295 cm², des culasses 370 cm²; induction dans le noyau 14700, dans les culasses 11700; intensité normale en pleine charge 200 ampères; intensité à vide 26 ampères.

» L'intensité maximum relevée a atteint 725 ampères, soit 28 fois la valeur de régime à vide, et 3,6 fois le courant normal de pleine charge. Sur 402 fermetures la surintensité a été de :

28	0,25 fois pour 100	
24 à 28.....	3,7	—
20 à 24.....	5	—
16 à 20.....	11,4	—
12 à 16.....	12,2	—
8 à 12.....	14,4	—
4 à 8.....	21,2	—
2 à 4.....	17,1	} 31,9 —
1 à 2.....	14,5	

» On peut remarquer que, lorsque la surintensité a été considérable, le fer a été très fortement aimanté; l'induction rémanente élevée favorise la possibilité de grandes surintensités aux fermetures suivantes, car le transformateur ne reste en circuit que

peu de temps chaque fois et le régime ne s'établit pas. En pratique ceci se rencontre quelquefois; lorsque la fermeture d'un transformateur a fait déclencher un disjoncteur, il arrive que ce déclenchement se produit plusieurs fois de suite à nouveau lorsqu'on referme l'interrupteur.

» Il faut ajouter que ces surintensités dépendent des propriétés magnétiques du fer à des inductions beaucoup plus hautes que celles qu'on a coutume d'étudier, et que les propriétés des différents fers sont très variables aux hautes inductions. Par conséquent, des appareils qui paraissent identiques à tous points de vue et semblent avoir les mêmes constantes, quand on les relève dans les conditions normales de fonctionnement, peuvent se comporter de façons tout à fait différentes à la fermeture.

» 5. *Transformateur en charge.* — En posant les équations de la manière habituelle, et en les résolvant en tenant compte des termes exponentiels, on voit que l'intensité absorbée au primaire contiendra deux termes exponentiels $A_1' e^{a_1' t}$ et $A_2' e^{a_2' t}$, qui s'ajouteront à la valeur de régime. La présence de ces deux termes exponentiels transitoires provient de ce qu'il y a deux différents emmagasinelements d'énergie possibles : l'un, dans l'inductance primaire; l'autre, dans l'inductance secondaire (de même qu'on a deux termes exponentiels si l'on a un condensateur et une inductance dans un circuit); les coefficients a_1' et a_2' sont toujours négatifs et réels, contrairement au cas du condensateur et le départ du courant est toujours logarithmique et jamais trigonométrique ou oscillatoire.

» La résolution des équations amène à ce résultat que le courant absorbé par le primaire est la somme du courant à vide, auquel on doit ajouter son terme transitoire avec la constante de temps du primaire à vide, et du courant de charge auquel on doit ajouter le sien avec la constante de temps du secondaire fermé sur le circuit extérieur.

» Ceci est d'ailleurs naturel : l'établissement du flux est une nécessité indépendante de ce qu'est le circuit secondaire; le courant magnétisant doit donc s'établir selon la loi du double flux dans le cas de la surintensité maximum.

» Le secondaire, fermé sur un circuit plus ou moins inductif, est parcouru par un courant qui s'établit lui-même avec surintensité déterminée par les flux à créer dans les appareils d'utilisation; ce courant secondaire doit se reproduire dans le primaire, ce qui combine les deux surintensités.

» Le coefficient d'amortissement α' , relatif à l'établissement du flux dans le transformateur, est à peu près le même à vide et en charge. Cependant, dans ce dernier cas, les chutes de tension sont plus considérables; donc, comme nous l'avons vu ci-dessus, le régime permanent s'établira plus vite en réalité. La figure 9

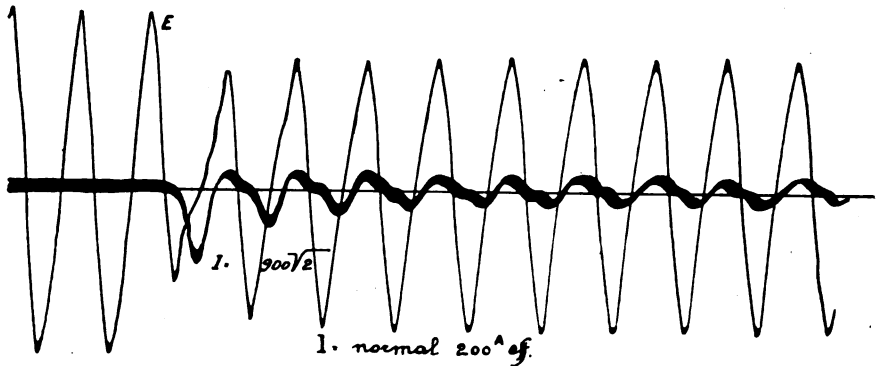


Fig. 9. — Transformateur en chrg (oscillogramme).

représente un oscillogramme relevé sur le transformateur assez saturé, dont il est parlé plus haut, en charge peu inductive.

» La figure 10 représente un oscillogramme relevé sur ce même appareil en charge fortement inductive; le secondaire est fermé sur un autre transformateur saturé; on voit que, dans ce cas, le secondaire aussi est le siège de surintensités considérables.

» On a relevé, comme dans le cas de la figure 8, la proportion de surintensités à la fermeture sur charge peu inductive. Sur 438 fermetures, on a obtenu :

6 fois le courant normal de pleine charge.....	1,85 pour 100
5 à 6 — —	15 —
4 à 5 — —	12,8 —
3 à 4 — —	11,9 —
2 à 3 — —	13,2 —
1 à 2 — —	45 —

» La comparaison de ces chiffres avec ceux relevés à vide

montre que l'intensité atteint une valeur plus considérable,

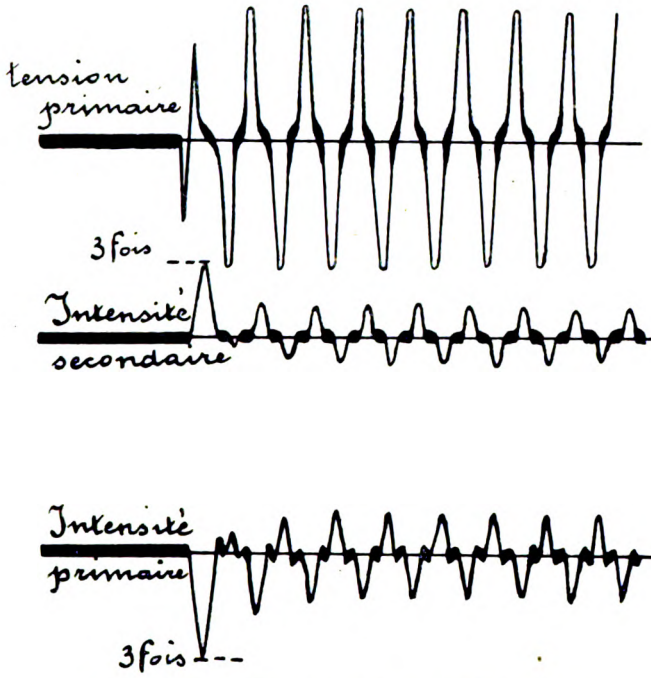


Fig. 10. — Transformateur en charge (oscillogramme).

1200 ampères au lieu de 725. Ces chiffres ne sont du reste pas très

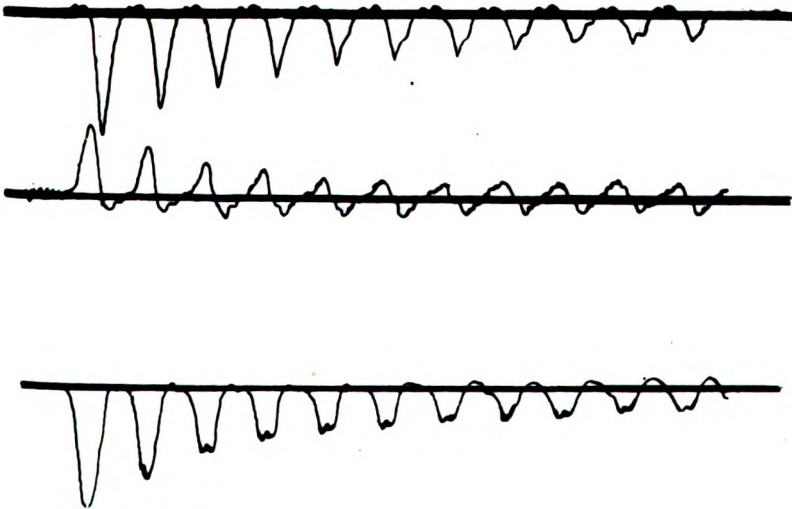


Fig. 11. — Transformateur triphasé (oscillogramme).

exacts, car une erreur assez forte peut avoir lieu dans l'estimation

des valeurs absolues des intensités par l'oscillographe que nous employons.

» La figure 11 représente la fermeture d'un transformateur triphasé.

5. En affectant des indices 1 et 2, les constantes relatives au primaire et au secondaire, on a

$$(7) \quad \begin{cases} E \sin(\omega t + \gamma) = r_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt}, \\ 0 = r_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt}, \end{cases}$$

où L_1 est le coefficient de self-induction total du primaire;

L_2 le coefficient de self-induction total du secondaire, appareil et récepteurs;

M le coefficient de mutuelle induction du primaire et du secondaire;

r_1 la résistance primaire;

r_2 la résistance secondaire, appareil et récepteurs:

On tire de là

$$(8) \quad \begin{cases} i_1 = \frac{E}{\varphi_1} \sin(\omega t + \gamma - \varphi_1) + A_1 e^{a_1 t}, \\ i_2 = \frac{E}{\varphi_2} \sin(\omega t + \gamma - \varphi_2) + A_2 e^{a_2 t}, \end{cases}$$

avec

$$(9) \quad \varphi_1 = \sqrt{r_1^2 + L_1^2 \omega^2}, \quad \varphi_2 = \frac{\varphi_1}{M \omega} \sqrt{r_2^2 + L_2^2 \omega^2},$$

$$(10) \quad \tan \varphi_1 = \omega \frac{L_1}{r_1}, \quad \tan \varphi_2 = \frac{1}{\omega} \frac{\omega^2 L_2 L_1 - r_2 r_1}{r_1 L_2 + r_2 L_1},$$

$$(11) \quad r = r_1 + r_2 \frac{M^2 \omega^2}{r_1^2 + L_1^2 \omega^2}, \quad L = L_1 - L_2 \frac{M^2 \omega^2}{r_1^2 + L_1^2 \omega^2}.$$

En dérivant les valeurs de i_1 et i_2 (8) par rapport à t et en portant dans (7), on a des termes en $\sin(\omega t + \gamma)$, en $\cos(\omega t + \gamma)$ et en e qui doivent s'annuler séparément; en n'écrivant que ces derniers, on a

$$(12) \quad \begin{cases} r_1 A_1 e^{a_1 t} + L_1 a_1 A_1 e^{a_1 t} + M a_2 A_2 e^{a_2 t} = 0, \\ r_2 A_2 e^{a_2 t} + L_2 a_2 A_2 e^{a_2 t} + M a_1 A_1 e^{a_1 t} = 0; \end{cases}$$

d'où

$$(13) \quad \begin{cases} a_1 = a_2 = a, \\ (r_1 + L_1 a) A_1 + M a A_2 = 0, \\ (r_2 + L_2 a) A_2 + M a A_1 = 0 \end{cases}$$

et

$$(14) \quad (L_1 L_2 - M^2) a^2 + (r_1 L_2 + r_2 L_1) a + r_1 r_2 = 0,$$

$$(15) \quad a = \frac{-(r_1 L_2 + r_2 L_1) \pm \sqrt{(r_1 L_2 - r_2 L_1)^2 + 4 r_1 r_2 M^2}}{2(L_1 L_2 - M^2)} = \begin{cases} a' = \sqrt{-} \text{ signe } +, \\ a'' = \sqrt{-} \text{ signe } -, \end{cases}$$

a étant donné par une équation du second degré, avec deux racines, les équations

tions (8) doivent donc renfermer non pas un, mais deux termes exponentiels chacune et

$$(16) \quad \begin{cases} i_1 = i_1 \text{ permanent} + A'_1 e^{a't} + A''_1 e^{a''t}, \\ i_2 = i_2 \text{ permanent} + A'_2 e^{a't} + A''_2 e^{a''t}. \end{cases}$$

On voit que a' et a'' sont réels, la quantité sous le radical étant essentiellement positive; ils sont négatifs car a'' est négatif et $a'a''$ positif.

Si l'on fait $t = 0$, on doit avoir $i_1 = i_2 = 0$:

$$(17) \quad \begin{cases} 0 = \frac{E}{\rho_1} \sin(\chi - \varphi_1) + A'_1 + A''_1, \\ 0 = \frac{E}{\rho_2} \sin(\chi - \varphi_2) + A'_2 + A''_2, \\ 0 = (r_1 + L_1 a') A'_1 + (r_1 + L_1 a'') A''_1 + M a' A'_2 + M a'' A''_2, \\ 0 = (r_2 + L_2 a') A'_2 + (r_2 + L_2 a'') A''_2 + M a' A'_1 + M a'' A''_1. \end{cases}$$

On tire de là

$$(18) \quad \begin{cases} A'_1 = \frac{L_2 B_1 - M B_2}{L_1 L_2 - M^2}, & A'_2 = \frac{L_1 B_2 - M B_1}{L_1 L_2 - M^2}, \\ A''_1 = \frac{L_2 C_1 - M C_2}{L_1 L_2 - M^2}, & A''_2 = \frac{L_1 C_2 - M C_1}{L_1 L_2 - M^2}, \end{cases}$$

avec

$$(19) \quad \begin{cases} B_1 = \frac{1}{a' - a''} \left[(r_1 + L_1 a'') \frac{E}{\rho_1} \sin(\chi - \varphi_1) + M a'' \frac{E}{\rho_2} \sin(\chi - \varphi_2) \right], \\ B_2 = \frac{1}{a' - a''} \left[(r_2 + L_2 a'') \frac{E}{\rho_2} \sin(\chi - \varphi_2) + M a'' \frac{E}{\rho_1} \sin(\chi - \varphi_1) \right], \\ C_1 = \frac{-1}{a' - a''} \left[(r_1 + L_1 a') \frac{E}{\rho_1} \sin(\chi - \varphi_1) + M a' \frac{E}{\rho_2} \sin(\chi - \varphi_2) \right], \\ C_2 = \frac{-1}{a' - a''} \left[(r_2 + L_2 a') \frac{E}{\rho_2} \sin(\chi - \varphi_2) + M a' \frac{E}{\rho_1} \sin(\chi - \varphi_1) \right]. \end{cases}$$

Dans le cas du transformateur parfait, fermé sur résistance pure, on a $L_1 L_2 = M^2$, et l'équation (15) devient

$$-a = \frac{r_1 r_2}{r_1 L_2 + r_2 L_1}.$$

Il n'y a évidemment qu'une valeur de a puisque le secondaire n'a plus de constante de temps, on ne peut y accumuler d'énergie.

r_1 est négligeable devant r_2 (les constantes secondaires ramenées au primaire), car r_2 représente la charge et r_1 la perte primaire, donc a a comme valeur approchée

$$a = -\frac{r_1}{L_1},$$

comme dans le cas du secondaire ouvert.

Au lieu de discuter l'équation (15) complète, on peut tirer des valeurs approchées de a' et a'' en posant $L_2 = l_2 + \lambda$; l_2 est alors la portion de L_2 telle que $L_1 L_2 = M^2$, c'est-à-dire qu'on suppose un transformateur parfait et qu'on reporte tous les

flux extérieurs dans le coefficient λ placé dans le secondaire. On obtient alors

$$(20) \quad \left\{ \begin{array}{l} a'' = -\frac{r_2}{\lambda} = \text{constante de temps secondaire,} \\ \text{et comme} \\ a' a'' = \frac{r_1 r_2}{L_1 \lambda}, \\ a' = -\frac{r_1}{L_1} = \text{constante de temps primaire.} \end{array} \right.$$

Le courant primaire pourra donc s'écrire en complétant (6)

$$\begin{aligned} i_1 &= \frac{E}{\sqrt{r_1 + L_1^2 \omega^2}} \left[\sin(\omega t + \chi - \varphi) - \sin(\chi - \varphi) e^{-\frac{r_1}{L_1} t} \right] \\ &\quad + \frac{E}{Z} \left[\sin(\omega t + \chi - \psi) - \sin(\chi - \psi) e^{-\frac{r_2}{\lambda} t} \right] \\ &= \text{courant à vide (permanent + transitoire)} \\ &\quad + \text{courant de charge (permanent + transitoire).} \end{aligned}$$

Dans les calculs ci-dessus, on a supposé les coefficients L et M constants; mais, comme ils le sont encore moins que dans le cas ordinaire du régime permanent, les valeurs qu'on en tire pour les surintensités, amortissements, etc., doivent être considérés comme des approximations ou être corrigées dans chaque cas d'une façon variable avec l'importance des variations de ces coefficients.

» 6. *Transformateurs couplés en parallèle.* — On a quelquefois constaté des surintensités gênantes entre transformateurs réunis en parallèle à la fois au primaire et au secondaire, surtout si les interrupteurs primaire et secondaire sont fermés au même moment. Si les secondaires sont réunis un instant très court avant les primaires, le transformateur n° 1 (fig. 12), quoique connecté et en régime depuis fort longtemps sera parcouru par la surintensité qui traversera le secondaire n° 2 par lequel commence à s'établir le flux n° 2. Puis l'interrupteur primaire du n° 2 se ferme; le flux continue à s'établir dans le n° 2, mais à la fois par le primaire et le secondaire, et définitivement le courant magnétisant ne sera plus que dans le primaire si les appareils sont semblables. Le transformateur n° 1 pourra donc faire déclencher son interrupteur automatique en même temps que le n° 2 si celui-ci est le siège d'une forte surintensité, et le circuit relié aux secondaires n'aura plus aucune alimentation par suite de la manœuvre qui avait pour but de soulager le transformateur n° 1.

Il y aura donc dans le transformateur n° 1 deux termes exponentiels successifs, l'un qui proviendra de la fermeture de l'inter-

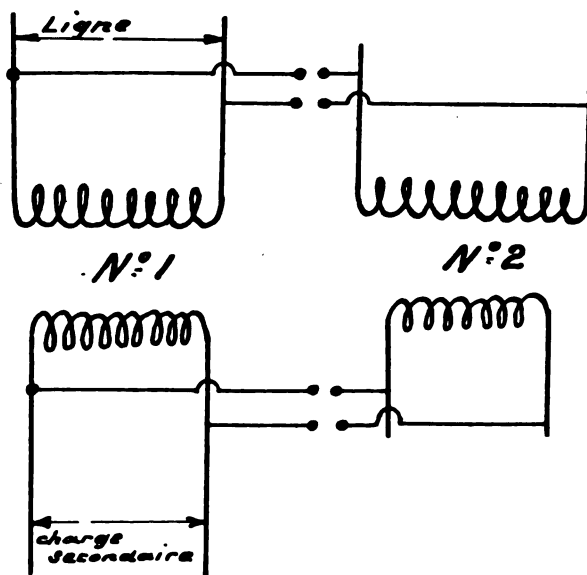


Fig. 12. — Transformateurs en parallèle.

rupteur secondaire et un autre de celle de l'interrupteur primaire qui change les conditions et introduit donc un nouveau terme transitoire. Il en résulte des courbes d'allures variées selon les époques absolue et relative des fermetures. La figure 13 repré-

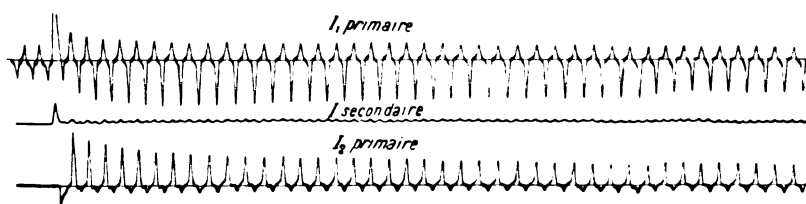


Fig. 13. — Oscillogramme de transformateurs en parallèle.

sente une forme assez curieuse où l'on voit nettement les deux exponentielles. Les secondaires sont à circuit ouvert. Si, au contraire, le primaire avait été fermé le premier, le transformateur n° 1 n'aurait d'abord eu aucune surintensité, mais si le secondaire du n° 2 est fermé trop tôt après il peut en exister une. La grande intensité qui circule dans le primaire n° 2 réduit le flux et donne une baisse de tension au secondaire. Les secondaires 1

et 2 étant mis en parallèle à tensions différentes il peut en résulter une surcharge considérable du n° 1; celui-ci doit aussi fournir une portion du complément de courant magnétisant nécessaire pour augmenter le flux du n° 2 à sa valeur normale, ce qui peut être assez important puisqu'il s'agit des valeurs extrêmes de l'induction.

» La figure 14 représente la fermeture d'un deuxième transformateur, le primaire étant relié un peu avant le secondaire.

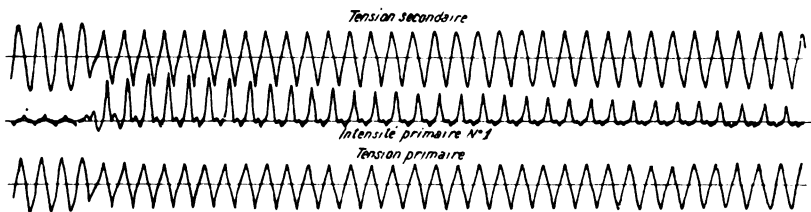


Fig. 14. — Oscillogramme de transformateurs en parallèle.

» La figure 15 représente la fermeture d'un deuxième transformateur, le premier étant en charge.

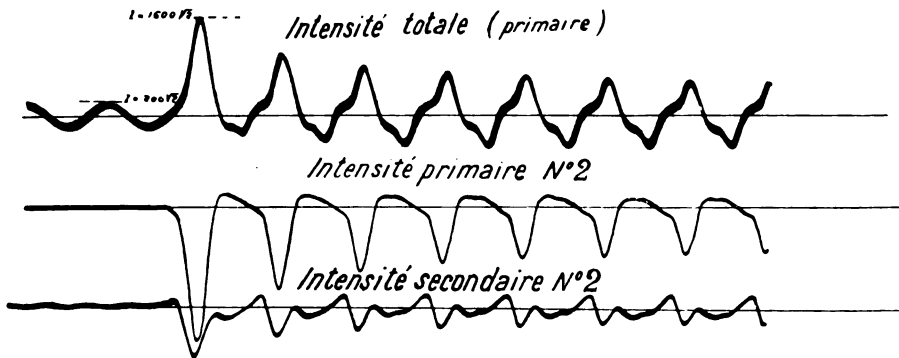


Fig. 15. — Oscillogramme de transformateurs en parallèle.

» Les surintensités ne se produisent pas à toutes les fermetures, elles n'ont pas lieu également avec tous les appareils, car elles dépendent toujours des allures des cycles magnétiques dans des limites plus étendues que celles que l'on considère d'ordinaire; certains transformateurs provoqueront donc le déclenchement des interrupteurs protégeant ceux déjà en service, plus facilement que d'autres ayant exactement les mêmes constantes en régime permanent.

» Le mieux est de renoncer à la fermeture simultanée des interrupteurs; on fermera le primaire et ensuite le secondaire; de la sorte les transformateurs déjà en service n'auront aucune surintensité s'ajoutant à la charge qu'ils possèdent déjà.

» 7. *Moteurs asynchrones.* — Les mêmes phénomènes ont lieu à la fermeture des moteurs asynchrones; le moteur peut tendre vers le double flux. Les courbes relevées, comme celles de la figure 16, indiquent des surintensités plus ou moins considérables.

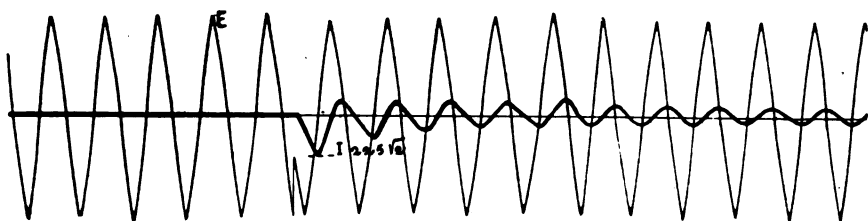


Fig. 16. — Oscillogramme de moteurs asynchrones.

Mais l'amortissement est rapide d'abord à cause des chutes de tension; de plus le courant à vide est beaucoup plus considérable que, dans un transformateur, L_1 est beaucoup plus petit, d'où $\frac{r_1}{L_1}$ beaucoup plus grand.

» 8. *Alternateurs synchrones.* — Lorsqu'un alternateur synchrone, que nous supposons d'abord polyphasé, est mis brusquement en court-circuit complet, il est parcouru par des courants considérables, beaucoup plus intenses que le courant de court-circuit permanent à excitation égale. Cela tient à ce que, dans les premiers instants du court-circuit, le flux ne peut varier à cause des circuits fermés sur eux-mêmes disposés sur l'inducteur, soit au moins le circuit d'excitation fermé sur l'excitatrice. Il s'ensuit que la f. e. m. E conserver sa pleine valeur, et que le courant qui en résulte est déterminé par l'impédance de l'induit, grâce à un coefficient d'inductance de fuites λ sur lequel nous reviendrons tout à l'heure.

» Le courant de court-circuit permanent est beaucoup plus faible, on le limite généralement par le dimensionnement même de la machine à deux ou trois fois le courant normal de pleine charge.

» Si $I_{c.c.}$ est le courant de court-circuit permanent

$$I_{c.c.} = \frac{E}{L_{\omega}},$$

L étant le coefficient de self-induction total de l'induit.

» Si $I'_{c.c.}$ est le courant de court-circuit instantané

$$I'_{c.c.} = \frac{E}{\lambda_{\omega}},$$

d'où

$$\frac{I'_{c.c.}}{I_{c.c.}} = \frac{L}{\lambda}.$$

» Les machines à grande vitesse auront généralement un coefficient L considérable, ou une grande réaction d'induit ces deux quantités allant de pair, et un coefficient λ faible, car il y a d'autant moins de surface de fuite que la machine tourne plus vite et à des dimensions plus petites.

» Donc $\frac{I'_{c.c.}}{I_{c.c.}}$ et par conséquent $\frac{I_{c.c.}}{I_{normal}}$ sera en général plus grand dans les machines rapides; aussi est-on obligé souvent d'ajouter des bobines de réaction pour les protéger; on augmente ainsi les deux termes de $\frac{I'_{c.c.}}{I_{c.c.}}$, soit L et λ , et le rapport décroît.

» Avec le temps, le flux finit par décroître et tomber à une faible valeur telle que la f. e. m. engendrée se réduise à celle qui est nécessaire pour faire circuler le courant $I_{c.c.}$ dans l'induit.

» Le courant de court-circuit prend ainsi comme première approximation un aspect analogue à celui de la figure 17. Le courant d'induit est enveloppé par deux courbes à allure d'exponentielles, qui représentent la diminution du flux avec le temps.

» Quant au courant dans l'inducteur, il prend l'allure représentée sur la figure 17. En effet, ce sont les courants induits dans cet inducteur fermé sur lui-même qui tendent à empêcher le flux de varier au début. Par conséquent, les a. t. inducteurs doivent augmenter d'une valeur égale à la réaction d'induit déterminée par $I_{c.c.}$, car puisque le flux est constant, les a. t. qui le produisent doivent l'être aussi. Ce courant revient ensuite à sa valeur normale au fur et à mesure que le courant d'induit diminue, soit que le flux disparaît. Les courants polyphasés de l'induit donnent une réac-

tion représentée par des a. t. fixes dans l'inducteur, et qui peuvent donc être exactement détruits par un courant inducteur variant selon la ligne de la figure 17.

» S'il y a des amortisseurs une importante surintensité les

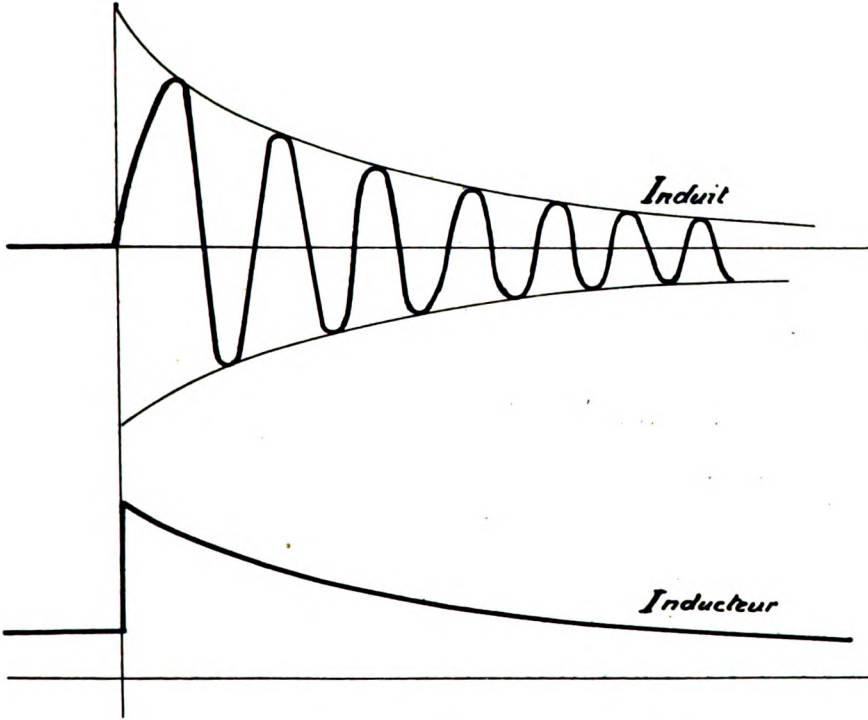


Fig. 17. — Courant de court-circuit d'alternateur polyphasé.

traversera, car ils tendront eux aussi à tenir le flux constant; cela réduira d'autant la surintensité de l'enroulement inducteur.

» Nous pouvons maintenant revenir sur le coefficient λ , en précisant quel est exactement le flux qui est constant. Dans le cas d'amortisseurs très importants, le flux maintenu constant est à peu près celui qui les traverse, et s'ils sont très près de l'induit, le flux dans l'induit est à peu près constant; le coefficient λ dans ce cas se rapproche du coefficient de fuites de l'induit seul. S'il n'y a pas du tout d'amortisseurs et s'il y a des fuites sensibles dans l'inducteur ou une certaine réactance en série avec lui, mais sans grande résistance, ce sera le flux total embrassant ce circuit total qui sera à peu près constant; comme nous avons vu que le courant inducteur augmente beaucoup, les flux de fuites

et flux extérieurs qui peuvent se développer librement sans a. t. antagonistes augmentent en même temps, d'où réduction du flux entrant dans l'induit. Il faudra donc dans ce cas réduire E proportionnellement; mais on pourrait aussi conserver à E la même valeur dans la formule $I'_{c.c.} = \frac{E}{\lambda \omega}$ et alors augmenter λ en conséquence. Ce terme deviendra ainsi une sorte de coefficients de fuites totales ramenées à l'induit (λ de Boucherot). S'il n'y avait pas d'amortisseurs et s'il y avait une grande résistance en série avec l'inducteur, le flux baisserait beaucoup dans l'induit et la surintensité serait alors réduite.

» On pourrait, dans chaque cas particulier, estimer la réduction de flux entrant dans l'induit, c'est-à-dire la réduction de f. e. m. qui divisée par $\lambda \omega$ donnerait la surintensité.

» 9. Nous voyons qu'en somme le court-circuit des alternateurs est une simple fermeture d'une f. e. m. sur des réactances. Nous devons donc superposer au phénomène représenté par la figure 17 ce que nous avons examiné plus haut pour les autres appareils inductifs. Ici les inductances étant constituées par les fuites des alternateurs le plus grand parcours des lignes de force sera dans l'air, et il n'y aura que fort peu à tenir compte de la saturation. On pourra donc confondre la courbe de λI avec celle de I . C'est pourquoi, si l'on désire limiter le courant de court-circuit par une réactance, il est préférable d'éviter la saturation ou même l'emploi du fer.

» En ce qui concerne l'induit, on aura donc à remplacer sur la figure 17 la ligne d'abscisses par l'exponentielle e^{at} où a sera la constante de temps du circuit de fermeture, soit $a = -\frac{r}{\lambda}$. Les trois phases d'un alternateur triphasé donneront donc, comme une même bobine fermée à des points différents de la différence de potentiel appliquée, trois exponentielles d'abscisses avec même amortissement a , mais avec des échelles différentes. Les courbes définitives d'intensité ramenées à axe rectiligne d'abscisses seront donc déportées en haut ou en bas selon l'instant de la fermeture, et plus ou moins pour chacune des phases.

» Dans un alternateur biphasé une des phases peut doubler, tandis que l'autre reste alors parfaitement symétrique.

» En ce qui concerne l'inducteur, il sera toujours le siège de courants tels que les a. t. en résultant soient opposés à la réaction d'induit du courant de court-circuit. On aura donc à combiner les effets des courants transitoires exponentiels traversant les enroulements polyphasés de l'induit. Le calcul montre facilement que ces termes de la forme De^{at} donnent comme résultante un système d'a. t. fixe dans l'induit, c'est-à-dire fixe dans l'espace si l'induit est fixe, tandis que les courants alternatifs donnent un champ tournant par rapport à l'induit, c'est-à-dire fixe dans l'inducteur. D'une manière générale les courants polyphasés traversent des enroulements polyphasés, créent en régime permanent un champ tournant. Mais au moment de la fermeture le champ était nul; il y a donc un état de transition. On doit superposer au champ tournant de régime un champ de direction fixe et décroissant avec le temps, dirigé de façon telle qu'à l'époque de la fermeture il soit égal et opposé à la valeur qu'aurait le champ tournant de régime à cet instant.

» L'inducteur ou rotor tourne donc, grâce aux termes exponentiels, dans un système d'a. t. de direction fixe et d'amplitude décroissante selon une loi exponentielle d'amortissement a , et qu'il doit amortir.

» S'il y avait un amortisseur parfait empêchant momentanément l'introduction de tout flux dans les bobines inductrices, cet amortisseur serait parcouru par des courants polyphasés donnant un système d'ampères-tours fixe dans l'espace, opposé aux a. t. du stator créés par les courants exponentiels.

» S'il n'y a aucun amortisseur, les bobines sont le siège de courants alternatifs de fréquence égale à celle de l'alternateur puisqu'ils sont développés par rotation dans les a. t. fixes.

» L'amplitude de ces courants décroît selon la même loi exponentielle que ces a. t.

» Ces courants alternatifs se superposent à la courbe de la figure 17 qui prend ainsi l'aspect des oscillogrammes des figures 18, 19, 20, 21 qui s'écartent d'autant plus de cette figure 16 que la constante de temps a est plus petite. La figure 18 est relative à un turbo-alternateur et les oscillations restent longtemps dissymétriques, les figure 19 et 20 sont relatives à une petite machine

avec résistance élevée, ce qui amène les courbes très vite à la symétrie. Il faut remarquer que, s'il n'y a pas d'amortisseurs sur l'in-

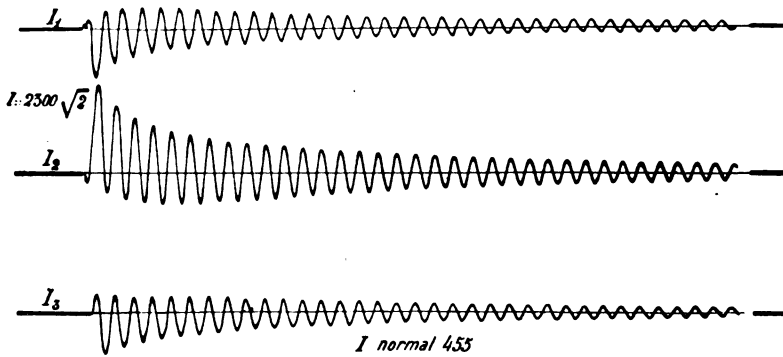


Fig. 18. — Oscillogramme de la mise en court-circuit d'un alternateur triphasé de 6600 k. v. a., 8400 volts, 45 périodes, 1350 t. m. La mise en court-circuit a été faite sous 2000 volts seulement.

ducteur, celui-ci est un simple circuit monophasé; les a. t. alternatifs dont nous venons de parler ne pourront donc compenser

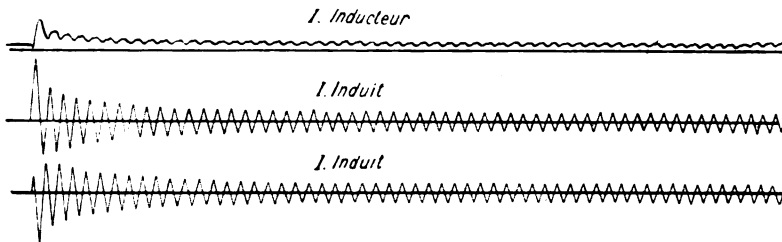


Fig. 19. — Oscillogramme de la mise en court-circuit d'un alternateur triphasé de 60 k. v. a., 1000 tours, 50 périodes.

un champ de direction constante. Ils se décomposeront en deux champs tournants, l'un dans une direction, l'autre dans la direc-

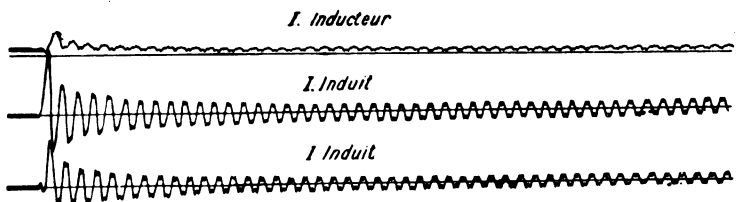


Fig. 20. — Oscillogramme de la mise en court-circuit d'un alternateur triphasé de 60 k. v. a., 1000 tours, 50 périodes.

tion inverse par rapport au rotor; donc, par rapport au stator, l'un fixe, l'autre de vitesse double de celle de la machine. Le premier compense les a. t. exponentiels; le second induit des f. e. m. de fréquence double dans les enroulements du stator d'où

création d'un courant de court-circuit de fréquence double superposé au premier et qui réagit ensuite sur le rotor, etc. S'il n'y avait aucun amortisseur polyphasé (barres de cuivre, boulons, masses polaires pleines, etc.) il y aurait donc des harmoniques sensibles dans les courbes de surintensité; leur importance diminuerait avec l'élévation de fréquence à cause de la réactance

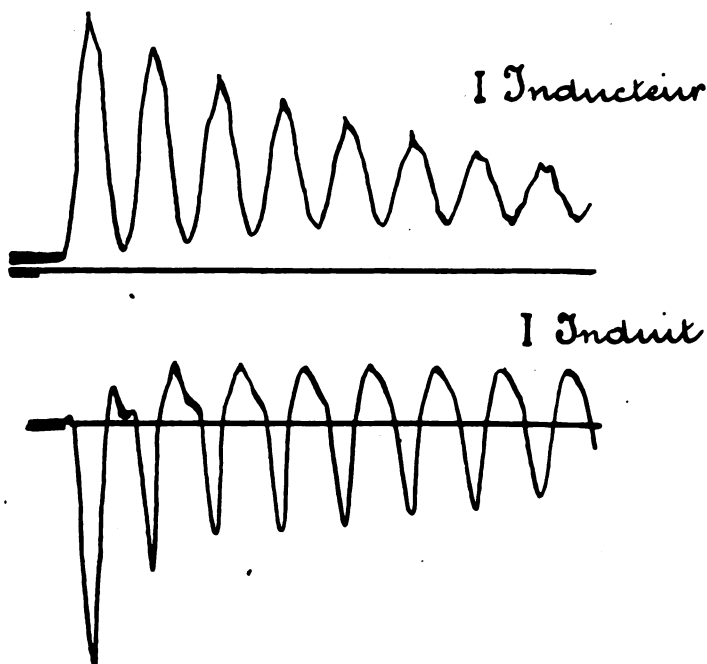


Fig. 21. — Oscillogramme de la mise en court-circuit d'un alternateur triphasé.

qui croît proportionnellement. En pratique, on ne les constate pas dans les alternateurs comme ceux des figures 18, 19, 20 qui sont l'un avec amortisseur, l'autre avec masses polaires pleines, les courbes sont même assez régulières, en comparaison de celles des transformateurs, à cause de la non-saturation des circuits inductifs. Par contre, la figure 21, relative à un turbo-alternateur sans amortisseurs et feuilleté, indique des harmoniques sensibles.

» Il y a d'autres harmoniques sur certaines courbes comme la figure 20 qui se rapporte à un enroulement biphasé. Mais c'est un harmonique 3 de construction qui existe aussi en régime. Il disparaît dans la figure 19 qui se rapporte à la même machine connectée en triphasé.

» Ces surintensités dans l'inducteur font, à cause de la résistance et de l'inductance de ce circuit, apparaître des tensions

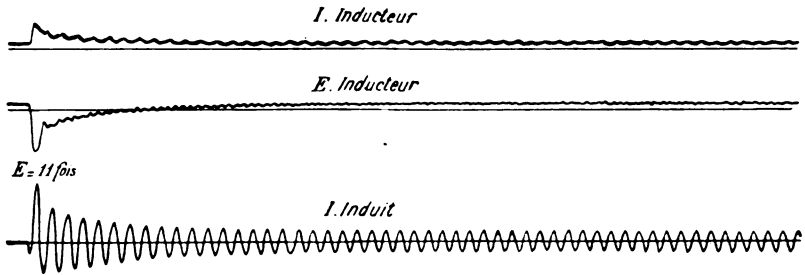


Fig. 22. — Oscillogramme de la mise en court-circuit d'un alternateur de 60 k. v. a.

considérables dans cet inducteur, par exemple entre bagues (fig. 22).

9. Soit un alternateur triphasé, d'après l'équation (6) on a

$$\begin{aligned} i_1 &= I \left[\sin(\omega t + \chi - \varphi) - \sin(\chi - \varphi) e^{at} \right], \\ i_2 &= I \left[\sin\left(\omega t + \chi - \varphi + \frac{2\pi}{3}\right) - \sin\left(\chi - \varphi + \frac{2\pi}{3}\right) e^{at} \right], \\ i_3 &= I \left[\sin\left(\omega t + \chi - \varphi + \frac{4\pi}{3}\right) - \sin\left(\chi - \varphi + \frac{4\pi}{3}\right) e^{at} \right]. \end{aligned}$$

Si l'on envoie ces courants dans trois enroulements décalés dans l'espace de $\frac{2\pi}{3}$ le premier terme du crochet, ou terme trigonométrique, donnera comme on sait un champ tournant représenté par $\frac{3}{2}I$, tournant synchroniquement dans l'espace si les enroulements induits sont fixes (stator), donc fixe dans l'inducteur (rotor).

Les termes transitoires exponentiels qui s'annulent pour $t = \infty$ donnent trois systèmes d'ampères-tours, qui, projetés d'abord sur la direction de l'axe de la bobine parcourue par le courant r_1 , deviennent

$$\begin{aligned} &\sin(\chi - \varphi) \\ &+ \sin\left(\chi - \varphi + \frac{2\pi}{3}\right) \cos \frac{2\pi}{3} \\ &+ \sin\left(\chi - \varphi + \frac{4\pi}{3}\right) \cos \frac{4\pi}{3} \end{aligned} \Bigg\} e^{at} = \frac{3}{2} \sin(\chi - \varphi) e^{at}.$$

En projetant dans la direction perpendiculaire, on aura

$$\begin{aligned} &0 \\ &+ \sin\left(\chi - \varphi + \frac{2\pi}{3}\right) \sin \frac{2\pi}{3} \\ &+ \sin\left(\chi - \varphi + \frac{4\pi}{3}\right) \sin \frac{4\pi}{3} \end{aligned} \Bigg\} e^{at} = \frac{3}{2} \cos(\chi - \varphi) e^{at}.$$

Le champ résultant des termes exponentiels est donc de direction fixe dans l'espace, puisqu'il est indépendant du temps en direction; sa grandeur décroît suivant une loi logarithmique $\frac{3}{2} I e^{-\alpha t}$, indépendante du moment de la mise en court-circuit ou de l'angle γ .

» 10. Il arrive fréquemment que le court-circuit intéresse simplement deux fils, ou qu'on a un alternateur monophasé en court-circuit. Le phénomène est alors plus complexe. En régime normal on a déjà, s'il n'y a pas d'amortisseurs appropriés et importants, des fluctuations considérables de l'intensité dans l'inducteur avec fréquence double, la réaction d'induit alternative pouvant se diviser en deux champs tournant en sens inverse de la manière bien connue.

» Au moment de la mise en court-circuit de l'induit, les courants développés agissent sur l'inducteur de la même manière qu'en polyphasé, le flux entouré par des circuits fermés sur eux-mêmes tendant à rester constant.

» De plus, les courants de double fréquence atteignent alors une importance plus grande dans l'inducteur; ils réagissent à leur tour sur le courant d'induit, car leur présence modifie toujours plus ou moins le flux entrant dans l'induit. C'est pourquoi les courbes prennent l'aspect beaucoup plus compliqué des figures 23 et 24 représentant la mise en court-circuit d'un alternateur monophasé sur interrupteur automatique d'après des oscillogrammes tirés de l'ouvrage de M. Steinmetz.

» Contrairement à ce qui se passe en polyphasé, le phénomène est tout différent selon le moment de la fermeture. En polyphasé les surintensités des divers enroulements de l'induit se combinent entre elles pour donner une résultante invariable : champ tournant + champ fixe amortis tous deux. En monophasé, il n'y a qu'un seul enroulement; on peut donc le fermer juste au moment d'un passage par zéro de l'intensité correspondant à la figure 17, et alors le courant d'induit reste symétrique, les termes exponentiels $e^{-\alpha t}$ disparaissant. Il en est de même pour l'inducteur qui accuse seulement une surintensité moyenne avec addition de fréquence double. La figure 23 a été prise dans ces conditions.

» La figure 24 au contraire a été prise avec termes exponentiels importants, c'est-à-dire que le courant de court-circuit relevé

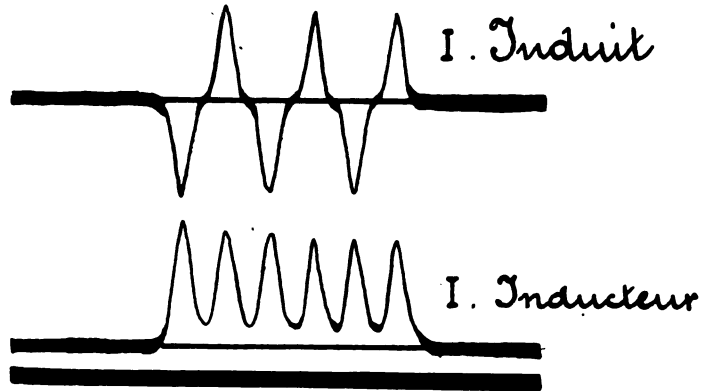


Fig. 23. — Oscillogramme de la mise en court-circuit d'un alternateur monophasé.

comme sur la figure 17 aurait été presque maximum au début;

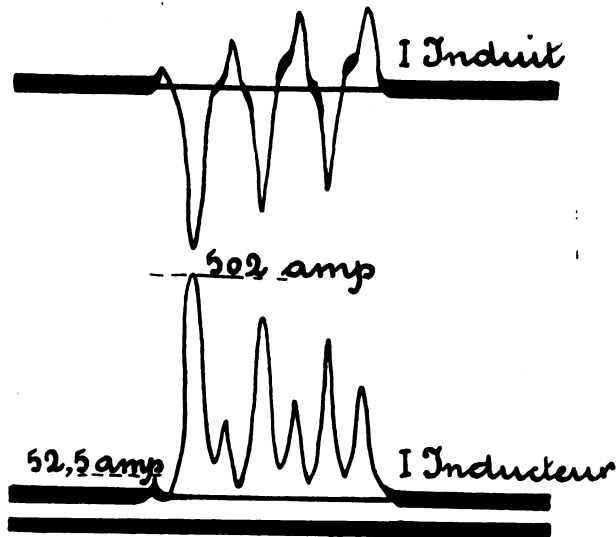


Fig. 24. — Oscillogramme de la mise en court-circuit d'un alternateur monophasé.

le courant d'induit est alors fortement déporté et la fréquence simple s'ajoute à la fréquence double dans l'inducteur.

» 11. Sans faire de théorie générale plus ou moins compliquée, nous pouvons, par quelques raisonnements approximatifs, avoir une valeur approchée des surintensités qui peuvent avoir lieu

dans les appareils mis brusquement en circuit ou dont les conditions de fonctionnement changent brusquement.

» On peut donc, dans chaque cas particulier, avoir une idée de la grandeur des efforts auxquels seront soumis les conducteurs et adopter les dispositifs prévenant les accidents qui pourraient en résulter.

» 12. Les oscillogrammes ci-dessus ont été tirés dans les ateliers de la Compagnie française Thomson-Houston, et je dois remercier particulièrement MM. Girault et Laroue de leur collaboration dans ces expériences délicates. »

M. le PRÉSIDENT remercie M. Bunet de sa Communication très intéressante et très documentée.

La séance est levée à 11 h 20 m du soir.

LISTE DES OUVRAGES

OFFERTS A LA SOCIÉTÉ INTERNATIONALE DES ÉLECTRICIENS.

(Suite.)

La Bibliothèque est ouverte aux Membres de la Société, tous les jours
de 3 heures à 6 heures, excepté les dimanches et jours de fêtes.
12, rue de Staël.

France.

Manuel de l'ingénieur. Nouvelle édition française du Manuel de la Société
« Hutte », traduit par L. DESMARET, Paris et Liège, Ch. Béranger, 1911 ;
2 vol. in-16, reliés. (*Don de l'éditeur.*)

*Précis de Télégraphie sans fil. Complément de l'Ouvrage « Les Oscillations
électromagnétiques et la Télégraphie sans fil »* du professeur Dr J. ZENNECK.
Ouvrage traduit de l'allemand par P. BLANCHIN, G. GUÉRARD et E. PICOT.
Paris, Gauthier-Villars, 1911 ; 1 vol. in-8°, broché. (*Don de l'éditeur.*)

Radioactivité (La) et la constitution de la matière, de Battelli, Occhialini et
Chella. Compte rendu par R. DE BAILLEHACHE, (Extrait de la revue *Scientia*,
1911, vol. IX). Paris, F. Alcan ; Bologne, M. Zanichelli ; 1 brochure in-8°.
(*Don de l'auteur.*)

Technique (La) de la houille blanche et des transports d'énergie électrique,
par Étienne PACORET. 2^e édition complètement remaniée et considéra-
blement augmentée. Préface de M. A. BLONDEL. Paris, Dunod et Pinat,
1911 ; 2 vol. in-8°, brochés. (*Don des éditeurs.*)

Théorie (La) corpusculaire de l'électricité, les électrons et les ions, par Paul
DRUMAUX, Préface de M. ERIC GÉRARD. Paris, Gauthier-Villars, 1911 ; 1 vol.
in-8°, broché. (*Don de l'éditeur.*)

BULLETIN
DE LA
SOCIÉTÉ INTERNATIONALE
DES
ÉLECTRICIENS.

SOMMAIRE.

Compte rendu de la réunion mensuelle de juin 1911 : Admission de membres titulaires, p. 284. — Membres décédés, p. 284. — A propos des court-circuits d'alternateurs (M. **Boucherot**), p. 285. — Les installations électriques du chemin de fer électrique souterrain Nord-Sud de Paris (M. **Petit**), p. 293.
BIBLIOGRAPHIE, p. 360.
OUVRAGES OFFERTS, p. 362.

COMPTE RENDU

DE LA

RÉUNION ORDINAIRE MENSUELLE

du mercredi 7 juin 1911 ⁽¹⁾.

PRÉSIDENCE DE M. ARMAGNAT, VICE-PRÉSIDENT.

La séance est ouverte à 8 h 40 m du soir.

Le procès-verbal de la dernière réunion mensuelle est adopté.

Il est donné connaissance des Ouvrages offerts à la Bibliothèque de la Société (voir p. 362) et des demandes d'admissions suivantes :

⁽¹⁾ La Société n'est pas solidaire des opinions émises par ses Membres dans les discussions, ni responsable des Notes ou Mémoires publiés dans le *Bulletin*.

Bellet (Claude-Pierre-Henri), Ingénieur civil, 35, quai Saint-Vincent, à Lyon (Rhône). — Présenté par MM. Rigollot et de Valbreuze.

Collin (Pierre-Maurice-Henry), Ingénieur diplômé de l'École supérieure d'Électricité, 33, avenue Thiers, au Mans (Sarthe). — Présenté par MM. Janet et Chaumat.

Dainty (William-Reginald), Ingénieur-électricien, South Side, Mansfield Woodhouse (Notts.) (Angleterre). — Présenté par MM. Sabourain et de Valbreuze.

Mallat (Gustave), Ingénieur-électricien, 139, boulevard de la Reine, à Versailles (Seine-et-Oise). — Présenté par MM. Bertin et Orain.

Paradis (Maurice-Julien), Ingénieur à la Compagnie française Thomson-Houston, 42, rue des Perchamps, à Paris. — Présenté par MM. Bunet et Girault.

Sadovski (Alexandre-Jules de), 84, rue du Cherche-Midi, à Paris. — Présenté par MM. Janet et Chaumat.

Treichlinger (Ernest), Ingénieur en chef de la Compagnie des Compteurs Aron, 11, passage Doisy, à Paris. — Présenté par MM. Durand et de la Gorce.

Ces candidats sont élus membres titulaires de la Société internationale des Électriciens.

M. le Président fait part du décès de MM. *Bosscha*, secrétaire perpétuel de la Société hollandaise des Sciences, *Brüll*, ancien Président de la Société des Ingénieurs civils, *Barker*, *Cattaneo* et *Ch. Roger*; il en exprime les regrets de la Société.

L'ordre du jour appelle les Communications techniques.

A PROPOS DES COURT-CIRCUITS D'ALTERNATEURS.

M. BOUCHEROT. — « Messieurs, dans sa Communication du mois dernier, mon ami M. Bunet nous a fait connaître, entre autres choses intéressantes, l'explication que donne M. Steinmetz des surintensités à la mise en court-circuit brusque d'un alternateur. Il a apporté à la question des développements personnels contre lesquels je n'ai aucune critique à formuler, au contraire. Indépendamment des précisions qui en résultent pour certains détails intéressants qui avaient été laissés dans l'obscurité, il a pu ainsi rectifier l'expression inexacte de la surintensité.

» J'ai moi-même étudié à fond cette question dans le courant de l'année dernière et je vous demande la permission de vous soumettre mon explication.

» Je rappellerai d'abord rapidement l'explication de M. Steinmetz. C'est aussi celle que M. Miles Walker donnait, il y a quelque temps, à l'Institution of Electrical Engineers de Londres, et dont M. Giles nous a dit quelques mots :

« La réactance d'un des circuits de l'induit ωL_2 peut se décomposer en deux : la réactance de fuites $\omega \mathcal{L}_2$ et une autre correspondant à la portion du flux d'induit passant dans l'inducteur ; celle-ci nécessite un temps appréciable pour se développer, en sorte qu'au début du court-circuit la force électromotrice E_2 n'agit que sur la réactance $\omega \mathcal{L}_2$ et donne un courant $\frac{E_2}{\omega \mathcal{L}_2}$, beaucoup plus grand que $\frac{E_2}{\omega L_2}$. »

» D'après ce raisonnement, le facteur de surintensité serait $\frac{L_2}{\mathcal{L}_2}$.

» C'est une explication si l'on veut En voici une autre.

» Au premier instant du court-circuit, le flux dans l'inducteur est $\mathcal{F}_1$, celui qui développe dans l'induit la force électromotrice E_2 ; quand le régime du court-circuit polyphasé est établi, le flux dans l'inducteur est $\mathcal{F}_{1cc}$, beaucoup plus petit que $\mathcal{F}_1$, puisqu'il ne correspond plus qu'aux fuites de l'inducteur et de l'induit. Il y a donc, pendant le changement de régime, une variation de flux ($\mathcal{F}_1 - \mathcal{F}_{1cc}$)

dans l'inducteur. Si la résistance du circuit inducteur est R_1 , il en résulte une quantité d'électricité induite dans ce circuit

$$\frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_{1cc}}{R_1},$$

qui se manifeste sous forme d'un *courant continu*. Ce courant continu s'amortit sous la forme exponentielle, mais il peut atteindre dans les premiers instants des valeurs considérables; les courants alternatifs de court-circuit dans l'induit atteignent de ce fait, eux aussi, des valeurs considérables, puisque, en court-circuit, il y a proportionnalité entre les courants induits et le courant inducteur.

» Que l'alternateur ait peu ou beaucoup de fuites, la quantité d'électricité induite dans l'inducteur pendant l'état variable reste à peu près la même, car les fuites ne font varier que $\bar{x}_{1cc}$, petit devant $\bar{x}$; mais ce qui change grandement avec l'importance des fuites, c'est l'allure de l'exponentielle qui représente le courant. Pour une même quantité d'électricité, cette exponentielle peut être plus ou moins inclinée sur l'axe des temps, suivant que la *constante de temps* du circuit inducteur est plus ou moins grande (fig. 1).

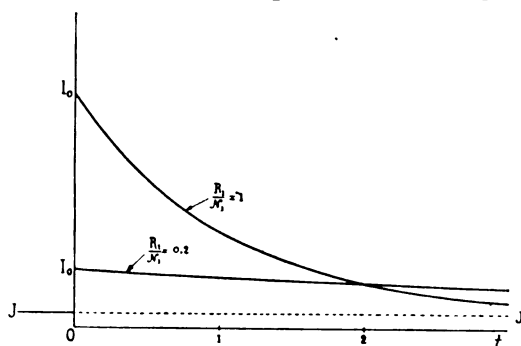


Fig. 1.

Si l'induit était ouvert, la constante de temps du circuit inducteur serait $\frac{L_1}{R_1}$, L_1 étant la self inductance totale de l'inducteur. Comme l'induit est fermé sur lui-même, la constante de temps de l'inducteur est $\frac{R_i}{\mathfrak{G}_1}$, où $\mathfrak{G}_1$ est l'inductance des fuites totales ramenées dans l'inducteur (¹). Le courant continu induit est donc de la forme

$$I_0 e^{-\frac{R_1}{\mathfrak{G}_1} t},$$

(¹) Voir ma Communication du mois d'avril sur les coefficients d'inductance.

et la quantité d'électricité induite lui est reliée par la formule

$$Q = \int_0^{\infty} I_0 e^{-\frac{R_1}{\mathfrak{L}_1} t} dt = I_0 \frac{\mathfrak{L}_1}{R_1};$$

d'où la valeur de ce courant continu, au début du court-circuit

$$I_0 = Q \frac{R_1}{\mathfrak{L}_1},$$

inversement proportionnelle aux fuites *totales* de l'alternateur, et non aux fuites de l'induit seul.

» On a, d'autre part, en ramenant l'inducteur à une seule spire pour simplifier,

$$\begin{aligned} \mathcal{F}_1 &= L_1 J, \\ \mathcal{F}_{1cc} &= \mathfrak{L}_1 J, \end{aligned}$$

où J est le courant normal d'excitation; d'où encore

$$I_0 = \frac{L_1 - \mathfrak{L}_1}{\mathfrak{L}_1} J,$$

qui peut encore s'écrire

$$I_0 = \frac{M^2}{L_1 L_2 - M^2} J,$$

M étant le maximum du coefficient de mutuelle inductance d'un des circuits de l'induit avec l'inducteur.

» Le courant total continu dans l'inducteur, au premier instant du court-circuit, est donc

$$I_0 + J = \frac{L_1}{\mathfrak{L}_1} J,$$

et le facteur de surintensité, continue dans l'inducteur, alternative dans l'induit :

$$\frac{L_1}{\mathfrak{L}_1}, \quad \text{ou encore} \quad \frac{L_2}{\mathfrak{L}_2} \quad (1),$$

très différent de

$$\frac{L_2}{\mathfrak{L}_2}.$$

» Il convient d'ailleurs de remarquer que ce facteur de surintensité est $\frac{L_1}{\mathfrak{L}_1}$, qu'il y ait ou non un amortisseur dans l'inducteur.

(1) Voir ma Communication déjà citée.

» Le phénomène se complique de ce que, par un mécanisme analogue, des courants continus prennent naissance également dans les enroulements de l'induit, qui donnent lieu à un courant alternatif dans l'inducteur, lequel se superpose au courant continu pour donner finalement un courant ondulé amorti, ainsi que l'a bien montré M. Bunet dans la Communication rappelée. Mais, en général, l'inducteur n'étant pas constitué pour laisser passer les flux variables, la surintensité, continue dans l'induit et alternative dans l'inducteur, est rapidement amortie. On peut démontrer, même, qu'avec un véritable amortisseur dans l'inducteur, le courant alternatif y disparaît complètement.

» En résumé, laissant de côté ce courant alternatif dans l'inducteur, dont l'importance est secondaire, on peut dire : les surintensités considérables constatées dans les circuits induits des alternateurs de turbines à vapeur, mis brusquement en court-circuit, proviennent d'une surintensité continue, qui prend naissance dans l'inducteur par l'étouffement du flux qui suit la mise en court-circuit. Dans les alternateurs ordinaires ou volants, ayant plus de fuites, ces surintensités acquièrent moins d'importance, mais durent plus longtemps.

» Exposer les choses autrement, c'est mettre la charrue devant les bœufs.

» Je n'en dirai pas plus ce soir sur ce sujet, dont je n'ai parlé que parce que la question s'est trouvée mise sur le tapis. Je donnerai les formules complètes à l'appui de cette théorie ainsi que les développements nécessaires, dans un Mémoire au Congrès de Turin.

» Mais, puisqu'il est question des court-circuits d'alternateurs, je voudrais dire encore quelques mots au sujet d'une opinion très répandue, concernant les surtensions qui suivent la rupture des court-circuits.

» On répète volontiers ce raisonnement : si, au moment de la rupture d'un court-circuit, l'intensité instantanée est i_2 , l'énergie emmagasinée dans l'induit de l'alternateur est $\frac{1}{2} L_2 i_2^2$; cette énergie se dissipe dans la capacité C en dérivation sur le circuit considéré (capacité de la ligne, par exemple), en sorte que la tension monte

à une valeur u telle que

$$\frac{1}{2} u^2 C = \frac{1}{2} L_2 i_2^2,$$

d'où

$$u = i_2 \sqrt{\frac{L_2}{C}};$$

si C est petit, la tension peut monter à des valeurs considérables.

» On aurait le droit de raisonner ainsi si le courant était produit par une source n'ayant que de la self-induction : ce n'est pas le cas pour un alternateur dans lequel l'induction mutuelle joue un rôle aussi important.

» L'énergie potentielle ou intrinsèque d'un alternateur n'est pas localisée dans tel ou tel circuit électrique, mais dans le champ magnétique; elle est par conséquent bien plus grande à vide qu'en court-circuit. S'il n'y avait pas de fuites, elle serait nulle en court-circuit.

» Il est aisé de se rendre compte de ce qu'elle est à chaque régime. Prenons le cas d'un alternateur diphasé en charge quelconque, elle est

$$W = \frac{1}{2} L_1 J^2 + \frac{1}{2} L_2 i_2^2 + \frac{1}{2} L_2 i_2'^2 + m_{12} i_2 J + m_{12}' i_2' J,$$

formule dans laquelle L_1 , L_2 , J ont les significations précédentes, i_2 et i_2' sont les intensités instantanées par phase; m_{12} , et m_{12}' les coefficients de mutuelle inductance instantanés.

» Grâce aux relations entre $i_2 i_2'$, m_{12} et m_{12}' , elle se simplifie et devient

$$W = \frac{1}{2} L_1 J^2 + L_2 I_2^2 - M \sqrt{2} I_2 J \sin \psi,$$

dans laquelle I_2 est la valeur efficace des courants de l'induit; M le maximum des coefficients de mutuelle inductance et ψ le déphasage entre le courant et la force électromotrice dans chaque circuit.

» A circuits induits ouverts, l'énergie intrinsèque est ($I_2 = 0$)

$$W_0 = \frac{1}{2} L_1 J^2.$$

» Dans le régime du court circuit normal, on a sensiblement $\psi = \frac{\pi}{2}$

et $I_2 = \frac{MJ}{\sqrt{2}L_2}$ et l'énergie intrinsèque devient

$$W_{cc} = \frac{1}{2} L_1 J^2 + \frac{M^2 J^2}{2 L_2} - \frac{M^2 J^2}{L_2} = \frac{1}{2} \left(L_1 - \frac{M^2}{L_2} \right) J^2 = \frac{1}{2} \mathcal{K}_1 J^2,$$

donc, beaucoup plus petite qu'à circuits ouverts.

» Il n'y a donc certainement pas libération d'énergie dans le passage de la marche en court-circuit à la marche à vide; c'est dans le passage inverse qu'il y a libération d'énergie, laquelle donne lieu aux surintensités continues, dont j'ai parlé tout à l'heure.

» D'ailleurs, en supposant qu'il y ait libération d'énergie quelconque dans l'ouverture des court-circuits, on ne voit pas bien pourquoi cette énergie s'en irait tout entière dans les capacités en dérivation; l'inducteur, fermé sur lui-même, ou plus exactement sur l'excitatrice dont la résistance est négligeable, se chargerait bien d'en prendre quelque peu. Mais ceci n'est même pas à envisager.

» En réalité, je crois que, quand on a constaté des percements d'isolants consécutifs à des court-circuits, il faut en chercher l'explication dans l'une ou l'autre des raisons suivantes :

» Si l'on fait court-circuit brusquement sur une seule phase d'un alternateur diphasé, la surintensité continue se produit, quoique moindre, dans l'inducteur : il n'est pas étonnant que la tension monte dangereusement dans la phase restée ouverte.

» Si un court-circuit se rompt pendant l'état variable, c'est-à-dire pendant l'existence de la surintensité continue dans l'inducteur, quand le flux est encore important, par exemple les $\frac{3}{4}$ du flux normal $\mathcal{F}_1$, il se peut que la tension monte encore plus dangereusement dans la phase restée ouverte.

» Enfin, il n'est pas impossible qu'une surintensité continue se produise dans l'inducteur à la rupture d'un court-circuit, même quand le régime normal du court circuit est établi; il y a encore induction d'une quantité d'électricité $\frac{\mathcal{F}_1 - \mathcal{F}_{1cc}}{R_1}$ dans l'inducteur, mais de sens contraire à celle induite lors de la mise en court-circuit. Si le court-circuit est coupé instantanément, la constante de temps de l'inducteur est $\frac{R_1}{L_1}$ et il y a peu de chances que cela se produise,

puisque I_0 de sens contraire à J est plus petit que J . Mais la rupture ne se fait pas en réalité aussi simplement et l'on trouverait peut-être des cas où le fait peut se produire.

» Malheureusement, le calcul en serait pénible et je crois qu'il vaut mieux s'en remettre à l'expérience du soin de fixer nos idées à ce sujet. »

M. le Président remercie M. Boucherot de sa Communication et des éclaircissements qu'il a bien voulu apporter sur cette question très délicate.

**LES INSTALLATIONS ÉLECTRIQUES
DU CHEMIN DE FER ÉLECTRIQUE SOUTERRAIN NORD-SUD DE PARIS.**

M. J. PETIT. — « Le chemin de fer électrique souterrain Nord-Sud de Paris a ouvert à l'exploitation le 5 novembre 1910 une première section de son réseau. Successivement, les 8 février et 28 mars 1911, deux nouvelles sections ont été mises en service et, actuellement, l'exploitation s'étend sur une longueur de 11,5 km. La longueur totale du réseau, après achèvement, sera de 20 km en chiffres ronds.

» Chargé, comme administrateur délégué de l'Omnium lyonnais de Chemins de fer et Tramways, des études et de la direction des travaux de superstructure et des équipements électriques des lignes, je me propose de vous exposer, au cours de cette communication, l'ensemble des dispositifs d'ordre électrique que nous avons été amenés à réaliser.

» Parmi ces dispositions, quelques-unes, comme vous le verrez, se séparent d'une façon assez nette de celles qui ont été généralement mises en usage à ce jour dans les installations similaires.

» Actuellement plus de sept mois d'un fonctionnement ininterrompu et satisfaisant permettent de vous les présenter comme ayant acquis la consécration de l'expérience.

» Les difficultés que présente la ligne du Nord-Sud au point de vue exploitation, tant en raison de son profil en long que de son tracé en plan, lequel comporte de nombreuses courbes dont le rayon s'abaisse parfois jusqu'à 50 m, rendaient difficile par certains côtés la solution des différents problèmes que soulèvent les applications de la traction électrique (*fig. 1*).

» Le service d'une ligne métropolitaine est, vous le savez, Messieurs, particulièrement dur, et ne souffre dans aucune de ses parties de défaillance, même passagère.

» Chaque partie doit donc en être étudiée avec un soin tout particulier, et il n'est pas de petit détail qu'on doive abandonner au hasard.

» Je me propose de passer en revue tout d'abord les principes

généraux qui nous ont guidés dans le choix des dispositions que nous avons adoptées.

» La première question qui se pose dans une installation de ce

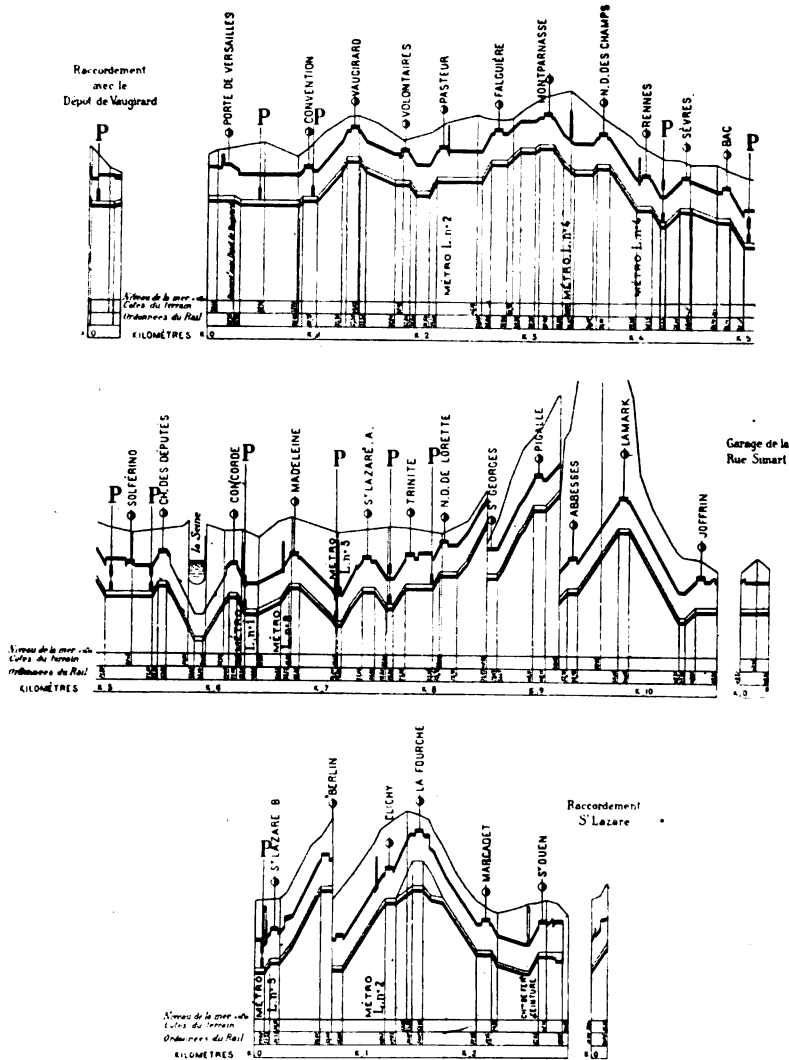


Fig. 1. — Profil en long. P, Poste d'épuisement.

genre est le choix du système de distribution de l'énergie électrique.

» Nos études, commencées en 1906, ne nous permettaient guère d'envisager à cette époque autre chose qu'une distribution classique à 600 volts.

» Au cours d'un voyage d'études que nous avons été amenés à faire à cette époque, alors qu'on commençait seulement à envisager l'utilisation de tensions légèrement supérieures à celle de 600 volts, nous avons rapporté la conviction que dans l'état actuel les constructeurs ne pouvaient nous offrir de garanties complètes de bon fonctionnement qu'en limitant notre choix à du matériel *standard*, c'est-à-dire à du matériel à 600 volts.

» Tout essai dans la voie des tensions supérieures nous paraissait pouvoir compromettre la réussite de l'entreprise ou, tout au moins, lui enlever cette sécurité de fonctionnement qu'il est indispensable de réaliser.

» Mais, tout en maintenant l'emploi des tensions habituelles, il nous a semblé qu'il y avait un progrès sérieux à réaliser dans le mode de distribution du courant, en tenant compte de ce fait que, les intensités à canaliser étant considérables, il y avait lieu de se préoccuper d'une façon toute particulière de l'emploi des conducteurs à la terre comme conducteurs de retour et de chercher à réaliser un mode de distribution présentant au point de vue des dangers de l'électrolyse une grande sécurité, et permettant en même temps d'augmenter le rayon d'action des sous-stations.

» Sans aller jusqu'à envisager l'emploi exclusif de conducteurs isolés qu'imposent les règlements administratifs du Board of Trade dans l'établissement des métropolitains anglais, à raison du coût élevé qui en résulte, nous avons cherché à nous en rapprocher autant que possible par l'emploi d'une distribution équilibrée à deux ponts. A notre avis, l'emploi direct d'une tension de 1200 volts, comme nous vous le disions tout à l'heure, présentait, à l'époque de nos études, de trop grands aléas pour que nous consentions à assumer la responsabilité de le proposer. Par contre, un système à 1200 volts avec deux conducteurs isolés permet, en partageant la différence totale de potentiel par moitié entre ces deux conducteurs et en maintenant le point neutre de l'installation à la terre, de faire une distribution qui, ayant la plupart des avantages de la distribution à 1200 volts, n'en a aucun des inconvénients.

PRINCIPE DU SYSTÈME DE TRACTION.

» En service courant, chaque train du Nord-Sud comporte deux voitures motrices : l'une en tête, l'autre en queue du train. Cette

disposition est du reste obligatoire sur le réseau, car l'absence de boucles aux terminus des lignes ne permet pas d'assurer la marche des trains toujours dans le même sens (fig. 2).

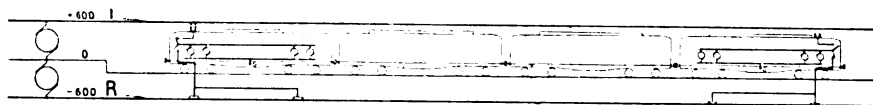


Fig. 2. — Principe du système de traction.

» L'une des motrices, la motrice de tête par exemple, recueillera le courant sur l'un des conducteurs, et l'autre motrice sur le second conducteur. La différence totale de potentiel utilisée par le train sera de 1200 volts sans qu'en aucun point des voitures la tension, par rapport à la terre, dépasse 600 volts.

» La partie du rail comprise entre la motrice de tête et la motrice de queue sert de conducteur de liaison et, si l'on suppose les puissances absorbées par les deux motrices rigoureusement égales, le courant de traction se répartit également entre les deux ponts, et le système de voies ferrées, en dehors de la partie de rails comprise entre les deux motrices, ne se trouve être le siège d'aucun courant de retour à la station.

» Les conditions de sécurité au point de vue du public sont donc rigoureusement les mêmes qu'avec le système actuellement en usage à la Compagnie du Chemin de fer Métropolitain de Paris.

» Ce système constitue-t-il une distribution à 600 volts ou à 1200 volts? C'est là une question d'interprétation de langage qui peut prêter à controverse. Au point de vue des règlements administratifs, c'est une distribution à 600 volts; car c'est la tension de chaque conducteur par rapport au sol. Au point de vue des isolements, à part quelques cas très exceptionnels traités comme tels, nous avons également affaire à un système à 600 volts. Il en est de même du matériel machines transformatrices et moteurs.

» Cette distribution a-t-elle tous les avantages d'une distribution à 1200 volts? Non, si l'on accepte le retour du courant total par les rails de roulement; oui, si l'on pose *a priori* la nécessité de rendre nuls ou négligeables les courants de circulation dans les rails de la voie de roulement. En effet, si l'on envisage l'ensemble d'un train parfaitement équilibré, tout le courant amené par le fil aérien revient par le rail de courant avec une différence de potentiel de 1200 volts entre les deux conducteurs, dont les sections doivent

par suite être calculées comme s'il s'agissait de 1200 volts. Il y a donc augmentation de portée par rapport au système à 600 volts, augmentation dont on peut se rendre compte aisément en remarquant que, pour une même section totale de conducteur isolé, supposé de même métal, on gagne dans le système du Nord-Sud toute la chute de tension dans les rails de retour, ce qui permet d'augmenter le rayon d'action des sous-stations.

» Le principe de la distribution que nous venons de décrire une fois accepté, la première question qui se pose est celle de la disposition à donner aux conducteurs isolés.

» Ces deux conducteurs ne peuvent pas être mis tous les deux au niveau du sol; si l'un d'eux peut être mis à l'extérieur de la voie, le second ne peut être mis dans l'axe entre les deux rails de roulement, à cause de sa trop grande proximité avec la masse des moteurs et, dans les croisements, à cause de cette même proximité avec les rails de jonction des voies.

» On ne pouvait également envisager, pour des raisons de gabarit et d'encombrement, et aussi de difficultés d'aiguillages, l'installation de deux fils aériens tendus au-dessus des trains. Ces fils forcément peu éloignés l'un de l'autre, avec une différence de potentiel de 1200 volts, auraient dû être sectionnés à chaque jonction ou croisement de voies.

» Les deux conducteurs ne pouvant être mis simultanément au niveau de la voie, ni posés simultanément en fils aériens, il ne restait plus qu'une seule solution : Mettre l'un des conducteurs aérien et constituer le second conducteur par un rail isolé au niveau des rails (troisième rail).

» Nous nous empressons de reconnaître cependant que cette solution présente un inconvénient : celui d'encombrer la plateforme de la voie et de lui apporter des sujétions graves au point de vue de l'entretien de la voie ferrée. Il peut paraître illogique d'accepter l'obligation simultanée de laisser sur la voie un rail à 600 volts avec tous ses inconvénients et d'innover l'emploi d'un conducteur aérien en matière de lignes métropolitaines. Mais, si l'on ne perd pas de vue qu'après avoir admis le principe des deux conducteurs isolés, nous avons reconnu l'impossibilité de les mettre dans un même plan, cet illogisme disparaît.

» Le schéma de la distribution se trouve donc réalisé par l'emploi d'un conducteur aérien tendu sensiblement dans l'axe de la voie, et d'un conducteur isolé posé au niveau des rails de roulement.

» Chacun de ces conducteurs présente une différence de potentiel de 600 volts avec la terre, et constitue une distribution à trois fils dont le fil neutre ou fil d'équilibre est constitué par les rails de roulement.

» Ayant exposé le principe général de la distribution du courant de traction, nous allons examiner avec quelques détails la constitution des lignes.

» Le rail latéral a un poids de 28 kg par mètre courant, suffisant pour qu'il n'y ait pas lieu de l'alimenter par feeders. Il n'en est pas de même du conducteur aérien. Après avoir envisagé plusieurs solutions pour la réalisation de ce conducteur aérien, notre choix s'est fixé sur un conducteur de cuivre dont la section est seulement de 150 mm². La solution adoptée pour celui-ci consiste à l'alimenter de distance en distance par des prises faites sur un feeder spécial régnant d'un bout à l'autre du souterrain et que nous désignerons sous le nom de *nourrice*.

» *Dispositions générales du réseau de traction.* — Cette disposition nous a conduit à adopter un mode de sectionnement qui permet de protéger très commodément le fil aérien et les trains (*fig. 3*). Le fil est sectionné en tronçons compris entre les milieux de deux stations voisines. Chacun des tronçons est alimenté en un seul point qui est l'origine de ce tronçon dans le sens du parcours. Cette alimentation se fait par l'intermédiaire d'un disjoncteur qui fonctionne soit par surintensité, soit en cas de rupture de fil. Ce dernier résultat est obtenu au moyen d'un solénoïde dont le milieu est relié au rail de roulement, une des extrémités à la nourrice; l'autre, par l'intermédiaire d'un fil pilote, à la fin du tronçon à protéger. Quand le disjoncteur est fermé, les deux moitiés du solénoïde se font équilibre et le noyau reste dans la position qu'il occupe quand il n'y a pas de courant sur la nourrice. Mais si, la nourrice étant sous tension, le fil de ligne vient à se rompre, une des moitiés du solénoïde reste seule active, ce qui provoque le déplacement du noyau et le fonctionnement du disjoncteur.

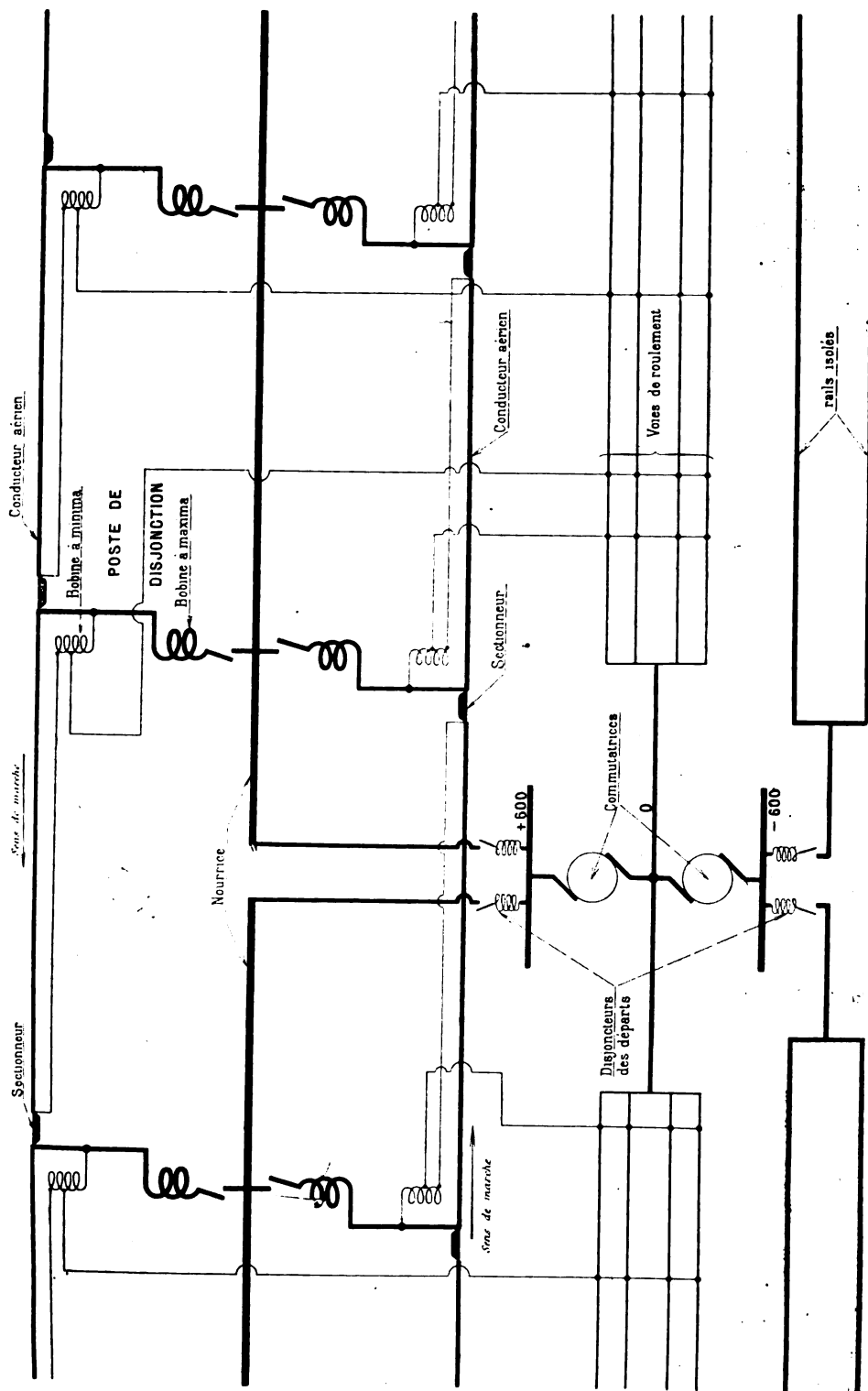


Fig. 3. — Schéma de la distribution du courant pour la traction.

LIGNE AÉRIENNE.

» La ligne aérienne est constituée par un fil de cuivre étiré en dur de 150 mm²; la section est un cercle de 15 mm de diamètre, comportant, en dessus du diamètre horizontal, deux rainures de 35° d'ouverture (*fig. 4*). Ce fil a été débité au tréfilage en

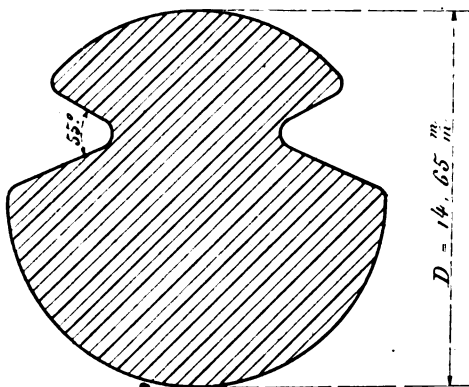


Fig. 4. -- Section du fil de trolley.

tronçons correspondant aux diverses sections de station à station; chacun de ces tronçons ne comporte que des soudures à l'argent faites en usine; à la pose il n'a été toléré aucune soudure ou amarrage mécanique; ces moyens ne seront employés qu'en exploitation dans un cas de rupture de fil.

» Il s'agissait de supporter cette ligne d'une section et par suite d'un poids inusités et cela dans des conditions de gabarit délicates mais, il est vrai, avec la possibilité de trouver à la voûte du souterrain des appuis aussi rapprochés qu'il était nécessaire.

» Trois systèmes se trouvaient en présence :

- 1^o Suspension caténaire;
- 2^o Points de suspension rigides;
- 3^o Suspensions élastiques, c'est-à-dire par transversaux.

» La suspension caténaire était évidemment le seul de ces systèmes qui permit de diminuer la tension dans le fil et d'obtenir une ligne parfaitement plane sans flèche appréciable, mais il n'était nullement démontré qu'aux vitesses pratiquées sur le Nord-Sud (45 km:h au maximum) le nivellement absolu, l'absence presque complète d'ondulation obtenue par la suspension caténaire fût nécessaire;

d'autre part l'un des avantages du catenaire, réduction de la portée suffisante pour qu'en cas de rupture du fil les bouts pendants restent hors d'atteinte, disparaissait complètement dans le cas qui nous occupe.

» Enfin si l'on considère que la hauteur entre le fil et la voûte varie de 40 cm à 50 cm en souterrain normal (*fig. 5*), on voit qu'il

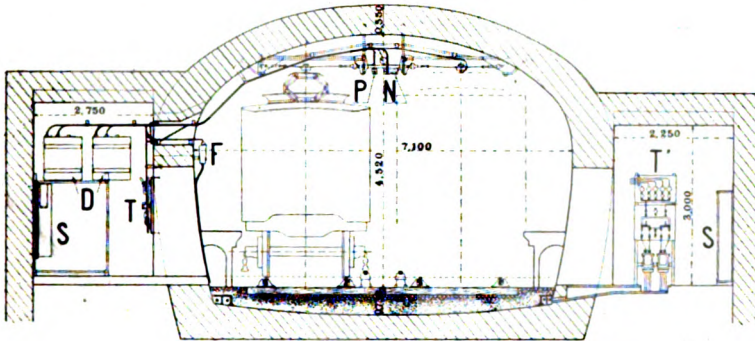


Fig. 5. — Coupe transversale du souterrain au droit des chambres de station.

N, Nourrice de traction; P, Feeder positif d'éclairage normal; F, Feeder négatif d'éclairage normal; D, Postes de disjonction; T, Tableau d'éclairage normal; T', Tableau d'éclairage de secours; S, Piles et relais de signaux.

était très difficile de loger les supports isolants, le câble porteur

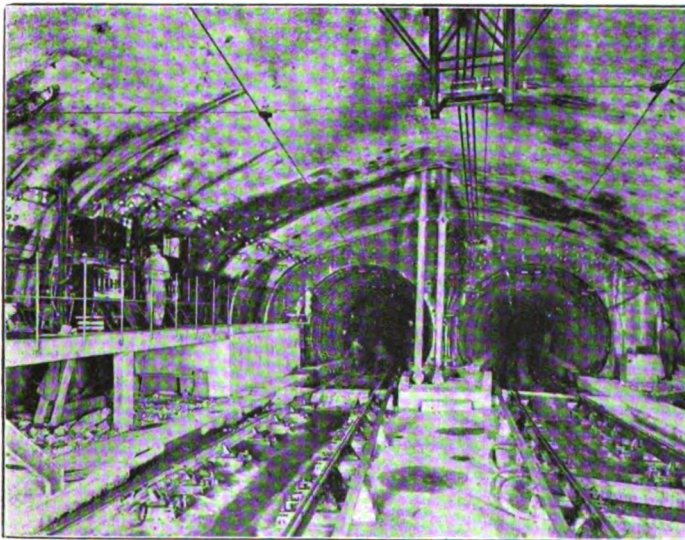


Fig. 6. — Entrée des souterrains tubulaires sous la Seine.

et le fil de travail; dans certains cas particuliers, souterrain à une voie; tube métallique sous la Seine (*fig. 6*), où la hauteur dis-

ponible tombe à 20 cm, le catenaire devenait rigoureusement impraticable.

» Le système des points d'appui rigides, qui pouvait nous tenter par sa simplicité, nous laissait trop à redouter, tant au point de vue de la fatigue de la ligne aux abords de ces points que des chocs subis par les appareils de prise de courant, pour que nous nous arrêtions à cette solution.

» C'est donc la suspension par transversaux qui a été adoptée.

» En ce qui concerne la hauteur de la ligne au-dessus du plan de roulement, on a établi les points de suspension à 3,80 m; la cote du fil tombe dans les cas défavorables (tube, tunnel à une voie, passage sous les passerelles), à 3,70 m, laissant encore un jeu de 20 cm par rapport au lanterneau des voitures.

» En plan, la ligne est établie dans le milieu de la voie, avec un mouvement de zig-zag de 75 mm d'amplitude de part et d'autre de l'axe de la voie; en courbe, le polygone est établi de telle sorte que les sommets et les milieux des côtés se trouvent également à 75 mm de l'axe.

» En ce qui concerne les portées, on s'est imposé, pour être certain de ne jamais atteindre la flèche extrême de 0,10 m, une flèche théorique de 0,05 m. Pour un fil de cuivre de 150 mm², pesant 1,33 kg par mètre courant et travaillant au $\frac{1}{2}$ de sa charge de rupture, soit 7 kg/mm², cette flèche conduit à une portée de 18 m.

» C'est là le chiffre qui a été admis en alignement; en courbe, la portée diminue en fonction du rayon de la courbe, étant donnée la limite de désaxement de 75 mm, et tombe pour les courbes de 50 m à 8 m.

» Enfin la tension totale est, d'après ce qui vient d'être dit, de $150 \times 7 = 1050$ kg. En ce qui concerne la suspension proprement dite, il est nécessaire de disposer, au droit de chaque transversal, d'un certain nombre de points d'ancrage; il fallait surtout arriver à réduire le nombre des scellements, toujours onéreux et particulièrement délicats dans les régions basses où la nappe d'eau peut atteindre le sommet de la voûte.

» On s'est arrêté à une ferrure en fermette (*fig. 7*) dont les principales caractéristiques sont les suivantes :

» Elle est fixée par quatre scellements seulement et conçue de

manière à équilibrer par des réactions intérieures les tensions des transversaux.

» Elle permet un réglage facile de la ligne en hauteur, assure

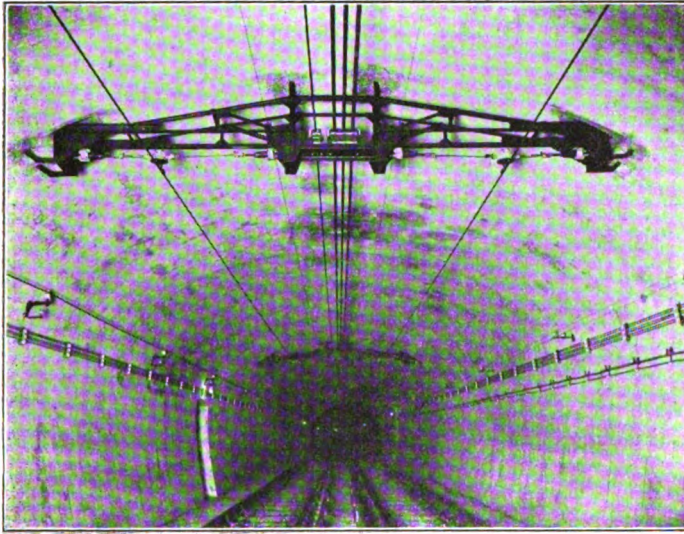


Fig. 7. — Fermette courante en souterrain.

l'indépendance des lignes des deux voies et enfin ménage dans son milieu un cadre qui se prête aisément à la fixation de quantité d'autres conducteurs.

» La fermette type ainsi établie a permis d'équiper toutes les

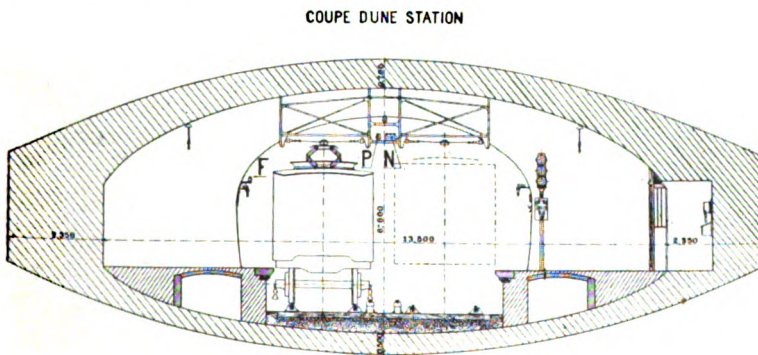


Fig. 8. — Coupe d'une station.

parties courantes de souterrain soit en ligne droite, soit en courbe; mais elle a dû se modifier pour ainsi dire à l'infini pour se prêter

à tous les cas spéciaux qu'on rencontre sur une ligne : stations



Fig. 9. — Garage du terminus « Porte de Versailles ».

(fig. 8 et 11), appareils de voie, souterrain à 3 et 4 voies, culottes



Fig. 10. — Ouvrage de raccordement des voies près la station « Saint-Lazare ».

de raccordement, planchers et passerelles coupant la voûte (fig. 9 et 10).

» *Matériel de ligne.* — Le matériel de ligne est un matériel de trolley adapté comme forme et surtout comme puissance au rôle spécial qu'il a à jouer. Chaque appui est constitué par un transversal en câble d'acier supportant en son milieu l'isolateur et fixé à ses deux extrémités par un Brooklyn.

» L'isolateur est en deux parties : une couronne solidaire du transversal et l'isolateur proprement dit qui vient s'emboîter dans la couronne; cet isolateur est constitué par une cloche métallique contenant la matière isolante moulée dans laquelle est noyé le boulon sur lequel vient se serrer l'oreille. Des cannelures ménagées dans la matière moulée augmentent la ligne de fuite; un relèvement du bord de la cloche rejette en dehors du fil l'eau qui viendrait à dégoutter.

» Le Brooklyn est un type renforcé du Brooklyn courant de tramway; le revêtement isolant de la tige est également cannelé.

» Le matériel a été soumis à des essais très rigoureux, conformément aux garanties données par le constructeur et dont les principales étaient les suivantes :

» Essais mécaniques : Brooklyn, traction de 4000 kg; boules isolantes de 5000 kg; oreilles de 1200 kg.

» Essais électriques : pour toutes les pièces isolantes, 15000 volts alternatifs pendant 10 minutes, isolement de 5 mégohms, isolement de 1 mégohm après immersion dans l'eau.

» L'isolateur et le Brooklyn réalisent entre la ligne et la terre un double isolement qui se comporte à merveille; nous n'avons eu, à ce jour, aucune mise à la terre de la ligne.

» Le sectionneur constitue une des pièces spéciales de l'appareillage de ligne du Nord-Sud. Nous nous étions dès le début imposé de le réaliser sans aucune matière isolante interposée; dans ce but les deux sections ont été arrêtées dans le prolongement l'une de l'autre par deux brooklyns, le passage des archets étant assuré par deux ponts latéraux. Mais l'expérience des premières semaines d'exploitation a prouvé que, même aux vitesses réduites auxquelles on aborde ces sectionneurs placés dans l'axe des stations, les moindres dénivellations de l'archet par rapport aux deux ponts latéraux suffisent à produire des chocs. On en est arrivé à cette conclusion que le passage sur les ponts ne peut se faire que par

bifurcation en Y; avec cette disposition et un nivellement des trois fils contigus à la bifurcation, fait avec une précision de l'ordre du millimètre, on obtient des passages de l'appareil de prise de courant sans choc sensible (*fig. 11*).

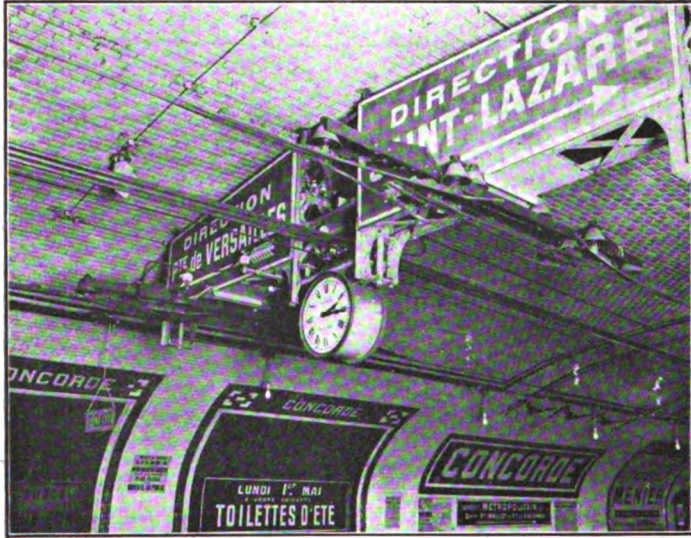


Fig. 11. — Fermettes de station, Sectionneurs.

» Enfin les aiguillages ont été réalisés sur un principe tout à fait analogue à celui du sectionneur.

» Il reste à signaler, en ce qui concerne le matériel de ligne, les dispositions spéciales qui ont été adoptées dans les tubes métalliques. La distance extrêmement réduite qui restait entre le transversal et les voussoirs de la clef s'opposait à l'emploi du matériel courant. A l'isolateur décrit plus haut on a substitué un isolateur constitué entièrement en matière isolante sans enveloppe métallique.

» Au Brooklyn, on a substitué un tendeur ordinaire à lanterne et le deuxième isolement a été réalisé par une chaîne de cinq porcelaines spéciales du type Vedovelli et Priestley; ce dispositif a donné de très bons résultats, les deux ou trois porcelaines cassées par des incidents d'ordre mécanique n'ont même pas été remplacées; l'isolement n'en a nullement souffert.

» *Pose de la ligne aérienne.* — La pose d'un fil ou plutôt d'une

barre de 150 mm² de section qui ne devait présenter la moindre inflexion surtout en profil, ni le moindre vrillage, puisque le plan des rainures de fixation doit rester invariablement horizontal, présentait des difficultés assez considérables. Elle s'est effectuée dans d'excellentes conditions, grâce au procédé entièrement mécanique employé par les entrepreneurs chargés de cette pose, MM. Vedovelli et Priestley, dont le nom reviendra souvent au cours de cette Communication.

» Le fil était posé en une seule opération à sa place et à sa tension ; pour cela, la voiture de pose comportait, sur une plate-forme réglable en plan et en élévation, un chariot à galets dans lequel passait le fil : les galets en tournant débitaient le fil à la vitesse d'avancement de la voiture et à une tension constante donnée par un poids solidaire du chariot.

» Cette voiture, dont les détails ingénieux exigeraient une trop longue description, a parfaitement atteint le but pour lequel elle avait été conçue.

» Avec une main-d'œuvre extrêmement réduite, on a atteint des avancements moyens journaliers de plus de 250 m ; jamais il n'a été nécessaire de revenir en arrière sur une ligne déjà posée et il s'est presque toujours trouvé, au cours des travaux, qu'une section était mise en charge immédiatement après l'arrivée de la voiture à un sectionnement.

» *Nourrice.* — La nourrice est constituée par trois câbles d'aluminium de 500 mm² de section chacun, équivalents au point de vue électrique à une section totale de cuivre de 900 mm² avec un poids total deux fois moindre. Ce câble est livré par longueurs de 1000 m, de telle sorte que le nombre des jonctions n'est pas considérable. Celles-ci (*fig. 12*) sont constituées par des cônes fendus en aluminium serrés sur les extrémités des câbles par un écrou à filets droite et gauche.

» Par crainte des phénomènes d'électrolyse, on a évité, autant que possible, le contact direct des métaux autres que l'aluminium. A cet effet, toutes les pièces de connexion (*fig. 13*) sont constituées par des blocs de serrage en aluminium appliqués sur le câble par des boulons en bronze étamé. Sur ces pièces de serrage

sont fixées les cosses en bronze étamé qui reçoivent les câbles de cuivre allant aux dérivations prises sur la nourrice.

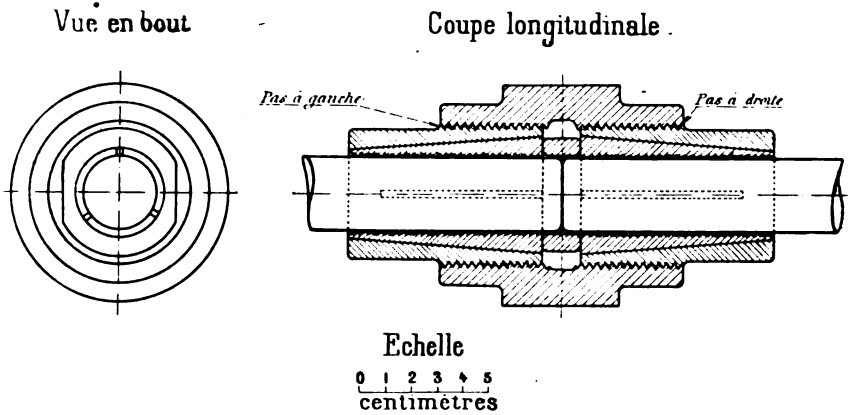


Fig. 12. — Jonction de câble en aluminium.

» La nourrice et un feeder d'éclairage dont nous parlerons plus

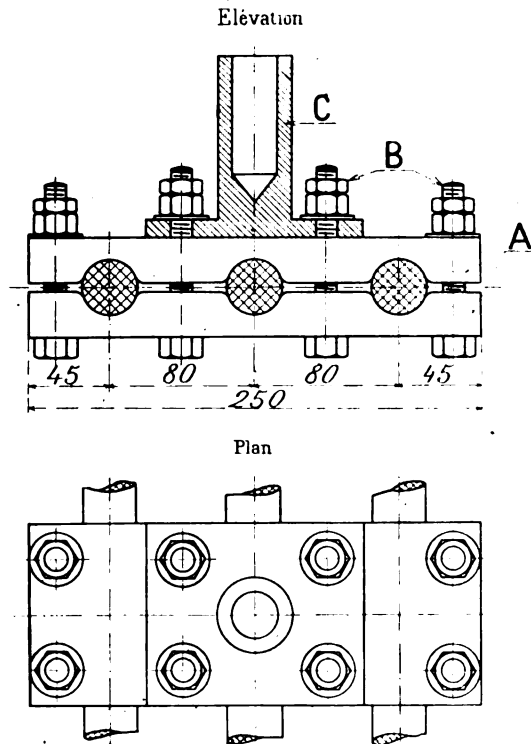


Fig. 13. — Prise de courant sur la nourrice en aluminium.

A, Pièce de serrage en aluminium; B, Boulons en bronze étamé; C, Cosse en bronze étamé.

loin et qui suit le même parcours sont supportés par des isolateurs

en verre (fig. 14) qui présentent quelques particularités intéressantes.

» La ferrure de fixation de ces isolateurs est constituée par deux

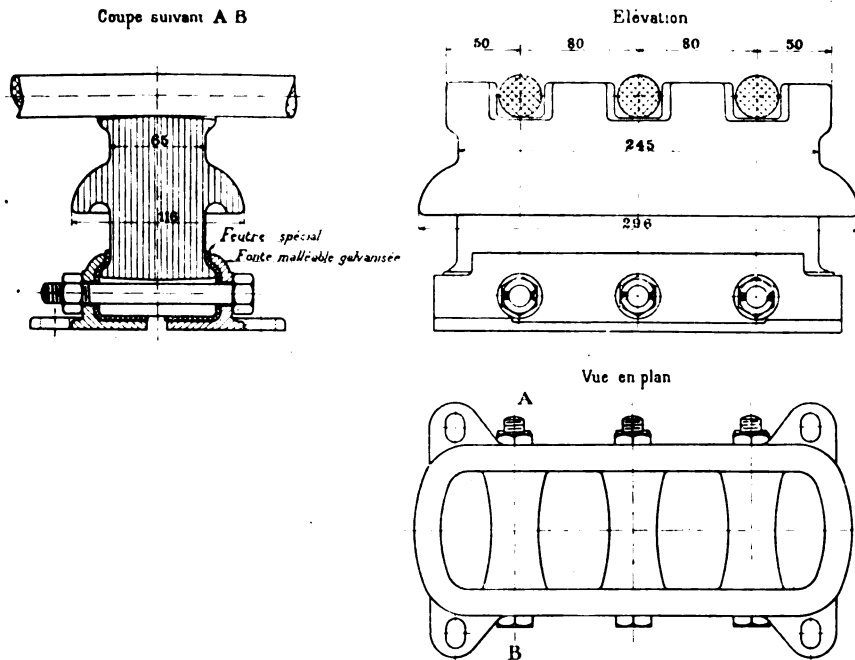


Fig. 14. — Isolateur en verre pour trois câbles de 500 mm².

mâchoires en fonte malléable galvanisée, qui enserrrent la base de l'isolateur, sur laquelle elles sont appliquées par deux boulons avec interposition d'un feutre spécial.

» La tête et la base de l'isolateur sont semblables, ce qui permet d'utiliser la même pièce avec ferrure en bas ou en haut. Cette dernière disposition a reçu son application aux traversées des passerelles où la hauteur faisait défaut.

» Les isolateurs sont supportés par un plateau fixé aux fermettes qui servent d'autre part à soutenir la ligne aérienne de prise de courant.

» *Postes de disjonction.* — Nous avons indiqué plus haut le principe des disjoncteurs protégeant la ligne aérienne dans chaque station. L'appareil qui réalise cette protection, enfermé dans une boîte métallique garnie intérieurement d'alabastrine, matière sur

laquelle nous aurons l'occasion de revenir au cours de cette Communication, peut être manœuvré par n'importe qui (*fig. 15*).

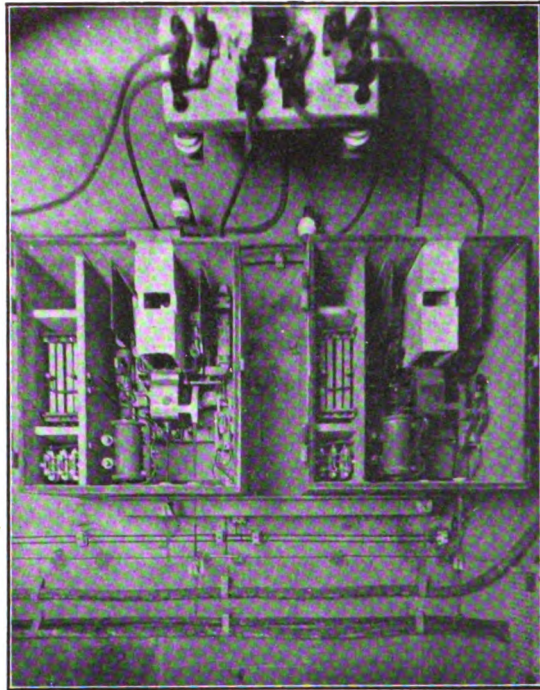


Fig. 15. — Postes de disjonction.

» On tire une poignée faisant saillie à l'extrémité d'une chaîne pour fermer le disjoncteur; une autre pour l'ouvrir. Le disjoncteur est à réenclenchement empêché et la sécurité est rendue plus grande par l'emploi d'une bobine de déclenchement supplémentaire, en série avec une résistance de 2 ohms qu'une paillette du disjoncteur met en circuit avant que la fermeture des contacts principaux ne se produise. Si l'on ferme sur un court-circuit, l'intensité du courant qui passe est ainsi réduite à 300 ampères.

» Il était nécessaire d'obtenir un réglage très précis de l'appareil, afin d'éviter les disjonctions intempestives, qui auraient donné des perturbations importantes et inutiles dans le service.

» La disjonction à maxima se produit pour 1500 ampères, chiffre qui permet le démarrage en parallèle d'un train ayant ses deux motrices sur pont fil, et qui est néanmoins assez faible pour assurer une protection efficace.

» D'autre part, les bobines à minima satisfont aux conditions de réglage suivantes :

» 1^o Non déclenchement lorsque, la nourrice étant à 600 volts par rapport au rail de roulement, la tension au fil pilote est descendue à 480 volts;

» 2^o Limite inférieure de fonctionnement de la bobine à minima pour une tension de 400 volts entre la nourrice et le rail de roulement;

» La première condition étant réalisée, un train peut démarrer en parallèle avec deux motrices sur pont fil à près de 800 m du point d'alimentation sans provoquer le déclenchement par la bobine à minima. Or aucune section n'atteint cette longueur. Le déclenchement intempestif n'est donc pas à craindre.

» La seconde condition garantit le fonctionnement à minima de l'appareil pour les tensions les plus basses qu'on puisse prévoir sur la ligne.

» Une sonnerie placée dans la station avertit le personnel que le poste de disjonction a fonctionné. Grâce au dispositif de réenclenchement empêché on peut toujours agir sans inconvénient sur la poignée de fermeture. S'il y a court-circuit permanent ou rupture de fil, l'appareil ne peut tenir fermé et il avertit ainsi lui-même de l'accident.

» *Troisième rail.* — Le troisième rail ne présente aucune particularité importante, sa forme est le T déjà adopté sur le chemin de fer Métropolitain, son poids de 29 kg au mètre courant. La conductibilité du métal employé a été l'objet de tous nos soins; après beaucoup de pourparlers, nous avons obtenu du fournisseur ce que, croyons-nous, on n'avait encore jamais obtenu en France : une garantie directe de conductibilité. Il était stipulé que les coulées seraient classées en cinq catégories suivant la résistivité qui variait de 13,3 à 15 microhms-centimètres; le prix de vente variait suivant la catégorie.

» Les essais effectués par l'Institut électrotechnique de Nancy ont permis de classer toutes les coulées dans la première catégorie, c'est-à-dire que la résistivité n'a pas dépassé 13 microhms-centimètres.

» Les barres qui avaient 18 m de longueur ont été soudées à l'aluminothermie sur l'une des lignes, par la soudure autogène au chalumeau à acétylène sur l'autre ligne.

» Le troisième rail est supporté toutes les trois traverses par un isolateur en grès; la forme générale de cet isolateur est tronconique; à mi-hauteur se trouve un larmier circulaire; en haut, une gorge transversale reçoit la branche verticale du T du rail.

» Entre le rail et l'isolateur, est placée une cale amortissante constituée par une plaque de feutre goudronné, maintenue par un feuillard de tôle. L'isolateur est fixé sur la traverse par deux équerres en tôle emboutie galvanisée, tire-fonnées dans la traverse.

» Au point de vue constitution, les isolateurs sont en grès vernissé de Pouilly; cette matière présente d'intéressantes qualités mécaniques et électriques. A la réception à l'usine, les isolateurs ont été soumis aux essais suivants :

» *Essais mécaniques.* — Sur 10 isolateurs essayés à la presse hydraulique entre une plaque de plomb et un rail à T placé dans la gorge :

1 isolateur a résisté à 18 tonnes,

8 isolateurs se sont fendus de 12 à 18 tonnes,

1 isolateur s'est cassé à 8 tonnes.

» *Essais à l'eau.* — Les isolateurs ont été placés pendant 6 heures dans l'eau à la pression de 6 kg, l'absorption d'eau en poids a été dans ces conditions et en moyenne de 0,6 pour 1000.

» *Essais électriques.* — Les isolateurs secs et après immersion dans l'eau sous pression ont supporté 10000 volts pendant 10 minutes et 50000 volts pendant quelques secondes. La résistance d'isolement n'a jamais été inférieure, même après immersion, à 300 mégohms.

MATÉRIEL ROULANT.

» Nous nous bornerons à rappeler les caractéristiques principales du matériel, au point de vue de sa construction, pour ne décrire que l'équipement électrique des voitures motrices.

» Les voitures sont entièrement métalliques. Les châssis de remorque et de motrice, identiques comme dimensions et constitution générale, sont constitués presque complètement en emboutis;

les bogies également en emboutis réalisent une double suspension élastique (*fig. 16*), la première par l'interposition de ressorts à

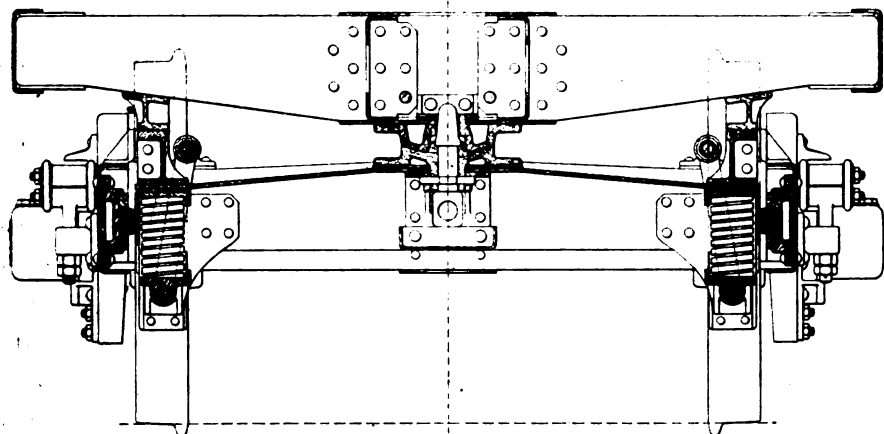


Fig. 16. — Suspension des voitures.

lame entre le châssis de bogie et la boîte à huile, la seconde par l'interposition de deux couples de deux ressorts hélice entre le châssis de bogie et la traverse danseuse qui supporte la caisse; la traverse danseuse est ainsi suspendue élastiquement par deux étriers à couteaux; son jeu latéral est limité par deux tampons élastiques. Cette disposition assure au matériel roulant une douceur qui ne vous aura certainement pas échappé. Nous signalerons enfin le mode de freinage à 16 sabots constitués par un porte-sabot en acier qui porte, fixé par deux griffes, un patin en matière fibreuse goudronnée, grâce auquel on obtient des freinages doux et surtout peu bruyants.

» Le poids des motrices à vide est de 32,5 tonnes pour une capacité de 82 places. Le poids des remorques est de 18,5 tonnes pour une capacité de 83 places en première et 92 en deuxième classe.

» Les trains pouvant être composés de 3, 4 ou 5 voitures et devant peser à vide environ 85, 100 ou 115 tonnes, le premier problème qui se pose est le nombre des voitures motrices à admettre; la question de décomposition ne se posant pas pour un métropolitain, il n'y a pas lieu de rendre toutes les voitures motrices, il y a lieu au contraire de concentrer la puissance motrice sur un nombre restreint de véhicules; les trains devant être symétriques et retour-

nables, il y aura au minimum deux motrices. Est-ce suffisant ? Oui évidemment pour le train à trois voitures. Mais pour le train à cinq voitures, qui, en première approximation, comportera une puissance motrice de 1000 à 1100 chevaux, il y a doute. Ces 1000 chevaux peuvent être répartis sur deux motrices de 500 chevaux ou trois motrices de 350 chevaux. La solution à deux motrices était manifestement plus économique, mais elle imposait évidemment, tant au point de vue de la puissance admissible par moteur qu'au point de vue des conditions d'adhérence, la nécessité de rendre tous les essieux moteurs; au point de vue puissance unitaire, il était en effet impossible de loger, sur un essieu comportant des roues de 930 mm, un moteur de 250 chevaux; au point de vue adhérence, la motrice à un seul bogie moteur ne pouvait pas permettre de satisfaire à une condition évidemment rigoureuse mais indispensable, à savoir la possibilité de démarrer en un point quelconque de la ligne avec une unité motrice hors de service, en entendant par unité motrice le plus petit groupe de moteurs qui puisse être isolé par une manœuvre simple.

» Enfin, il faut ajouter que l'abaissement de la puissance indivi-

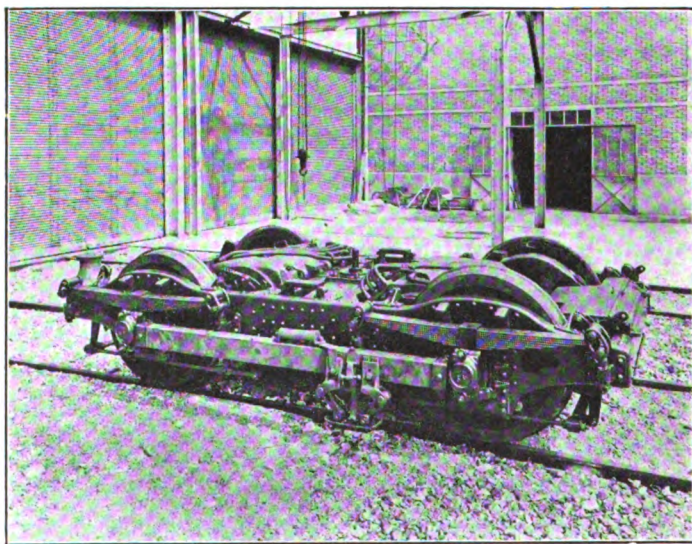


Fig. 17. — Bogie à 2 moteurs.

duelle des moteurs a permis de loger la traverse danseuse entre les

deux moteurs sans que l'empattement du bogie, qui est de 2,300 m, soit incompatible avec l'inscription dans des courbes dont le rayon s'abaisse jusqu'à 50 m (*fig. 17*).

» *Moteurs.* — La détermination de la puissance du moteur a été le résultat de plusieurs études et comparaisons : étude complète du parcours *Versailles-Place J. Joffrin* et *Saint-Lazare-Saint-Ouen*, avec tracé des courbes de vitesse et d'intensité pour chacune des interstations, étude qui a conduit à la valeur du courant moyen et par suite de la puissance continue; étude du démarrage, au point de vue des accélérations qu'on voulait obtenir et par suite de l'effort à la jante nécessaire; comparaison enfin avec les équipements existants au point de vue de la puissance par tonne nécessaire pour réaliser une vitesse commerciale de 22 km : h environ sur un profil aussi accidenté que celui du Nord-Sud. Ces études, confirmées par celles des constructeurs consultés, nous ont conduits au choix d'un moteur d'une puissance unihoraire de 125 chevaux.

» Les motrices à adhérence totale sont donc équipées avec quatre moteurs de 125 chevaux.

» Nous avons considéré comme nécessaire de partager entre deux constructeurs la fourniture de ces moteurs, tout en maintenant le principe de l'interchangeabilité. Il s'est ainsi posé un problème délicat. Bien que les vitesses des deux moteurs proposés fussent différentes, il fallait pouvoir les accoupler dans un même train, voire même sur une même motrice, sans qu'il en résultât un déséquilibre quelconque dans l'alimentation ni dans les échauffements relatifs des moteurs. Il a donc fallu, en premier lieu, faire déterminer par chacun des constructeurs la caractéristique de son moteur, s'assurer ensuite qu'on pouvait trouver deux rapports d'engrenages ayant un terme commun, la roue d'essieu, et, ramenant les deux caractéristiques en coïncidence, obtenir enfin des constructeurs le respect scrupuleux des caractéristiques promises. Il serait inexact de dire que cela a été tout seul; néanmoins, on est arrivé à se mettre d'accord sur les rapports de 19 : 69 et 17 : 69, tous deux acceptables, quoique 17 puisse être considéré comme limite inférieure du nombre de dents; avec ces rapports, les deux

caractéristiques ramenées à la vitesse en kilomètres par heure sur des jantes de 930 mm arrivaient à une coïncidence absolue entre 150 et 300 ampères et à un écart qui atteignait à peine 5 pour 100 aux plus faibles charges (fig. 18). Dans ces conditions, les écarts théo-

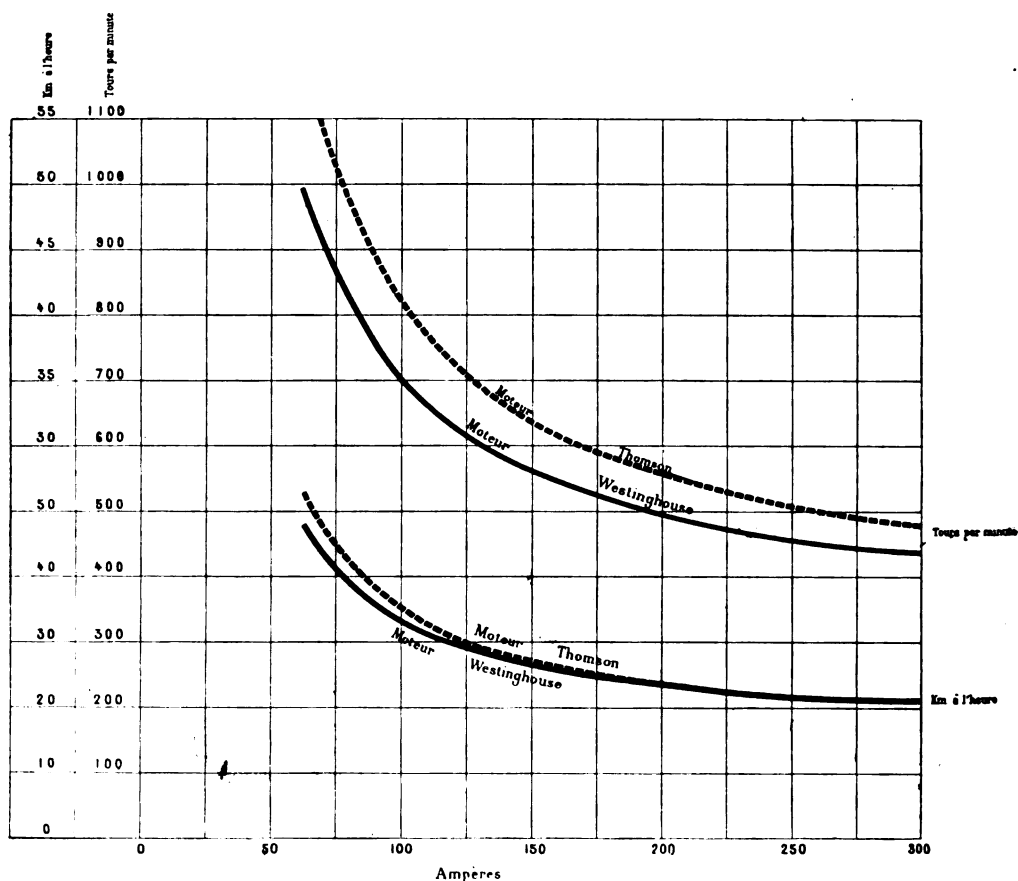


Fig. 18. — Caractéristiques des moteurs.

riques étaient inférieurs à ceux qui se produisent constamment par les différences d'usure des bandages, lesquelles dépassent 5 pour 100; ils étaient par conséquent parfaitement acceptables et il ne restait plus qu'à les conserver dans la pratique.

» C'est dans ces conditions que ces moteurs ont été construits, partie par la Société Westinghouse dans ses ateliers du Havre, et partie par la Société Thomson-Houston dans ses ateliers de Vaugirard.

» Les moteurs réalisés par les deux constructeurs présentent

de grandes analogies au point de vue des dispositions extérieures; il était d'ailleurs nécessaire, au point de vue de l'interchangeabilité, qu'ils pussent utiliser les mêmes points d'appui sur le bogie; cet appui est réalisé par une double suspension par le nez. Les deux carcasses sont *Box Type*; les coussinets d'induits sont renfermés, ainsi que leur graissage, dans deux joues paliers circulaires.

» Les roues dentées, en une seule pièce, sont calées à la presse sur l'essieu; les carters sont en aluminium fondu.

» Les coussinets d'induit sont seul antifriictionnés; les coussinets d'essieu sont en bronze au plomb.

» La différence essentielle entre les deux types de moteurs réside dans la présence, sur le moteur Thomson, de pôles auxiliaires. Si ce dispositif assure une commutation parfaite à tous les régimes, il serait injuste de dire qu'il confère à ce moteur une réelle supériorité sur l'autre; nous ne pouvons que reconnaître qu'ils ont donné tous deux également satisfaction en remarquant toutefois qu'ils n'ont été soumis encore qu'à un régime relativement doux puisqu'ils n'ont remorqué jusqu'à présent que des trains de 3 et 4 voitures.

» En ce qui concerne le couplage, les quatre moteurs sont groupés en deux groupes de deux moteurs constamment en parallèle; ces deux groupes sont couplés pour le démarrage, d'abord en série, puis en parallèle, le passage du premier au deuxième couplage se faisant par la méthode du pont; enfin un commutateur spécial permet, en cas d'avarie, de mettre hors circuit un moteur de chaque bogie.

» *Appareils de prise de courant.* — Le courant est recueilli sur le rail par quatre sabots, sur le fil par un archet.

» Les premiers de ces appareils ne présentent pas d'intérêt particulier, n'étant qu'une reproduction presque textuelle de ce qui a été fait antérieurement, en particulier, à la Compagnie du Métropolitain de Paris; nous y avons seulement ajouté un dispositif de réglage, constitué par deux peignes serrés l'un sur l'autre et permettant de maintenir constante la hauteur du sabot par rapport au plan de roulement, quelles que soient les usures du bandage ou des coussinets.

» L'archet est au contraire intéressant comme ayant permis de résoudre le problème délicat de recueillir sur un fil de cuivre de 15 mm de diamètre, à des vitesses de 40 km à l'heure, un courant de 600 ampères, atteignant même 800 ampères en pointe. Tout dispositif à roulette était inadmissible en raison de la nécessité de franchir sans aucune manœuvre les appareils de voie particulièrement nombreux dans les gares terminus; les pantographes, couramment employés dans les installations monophasées, ne pouvaient pas s'adapter sans d'importantes modifications en raison de la hauteur disponible : d'ailleurs, ils ne présentaient pas de sérieuses garanties pour recueillir les fortes intensités auxquelles ils n'ont jamais été appliqués. Il fallait, en un mot, un appareil présentant les caractéristiques suivantes :

Grande surface de contact permettant de recueillir 800 ampères;

Grande course et très faible hauteur à l'aplatissement;

Inertie aussi faible que possible;

Réversibilité automatique.

» Ce programme fut réalisé dans d'excellentes conditions par la maison Vedovelli, Priestley et C^o avec un appareil consistant essentiellement en un cadre rectangulaire, supporté par deux parallélogrammes articulés; quatre archets liés élastiquement au cadre assurent par leur indépendance et leur faible inertie la continuité du contact avec le fil (*fig. 19 et 20*).

» Les deux polygones articulés sont constitués chacun par quatre bras doubles liés aux articulations médianes par deux engrenages, cet ensemble assure le parallélisme constant des bases supérieures et inférieures du polygone; il en résulte que si l'archet, grâce à l'indépendance des deux parallélogrammes, peut prendre toutes les inclinaisons dans le sens du fil, il ne peut en prendre aucune transversalement, et, par suite, ne risque en aucun cas d'échapper latéralement au fil. Le cadre supérieur isolé porte chacun des quatre archets par l'intermédiaire de deux pistons à ressort.

» La manœuvre est pneumatique; un piston commandé par un robinet à trois voies bande, lorsqu'il est levé, deux ressorts à boudins qui tendent à fermer les polygones articulés et à soulever le cadre;

la pression d'appui est par conséquent indépendante de la pression d'air au cylindre et ne dépend que du réglage des ressorts.

» Enfin un dispositif de sécurité a été prévu pour que, dans le cas où l'archet quittant le fil se développerait entièrement, il se rabatte automatiquement; pour cela, les extrémités des quatre

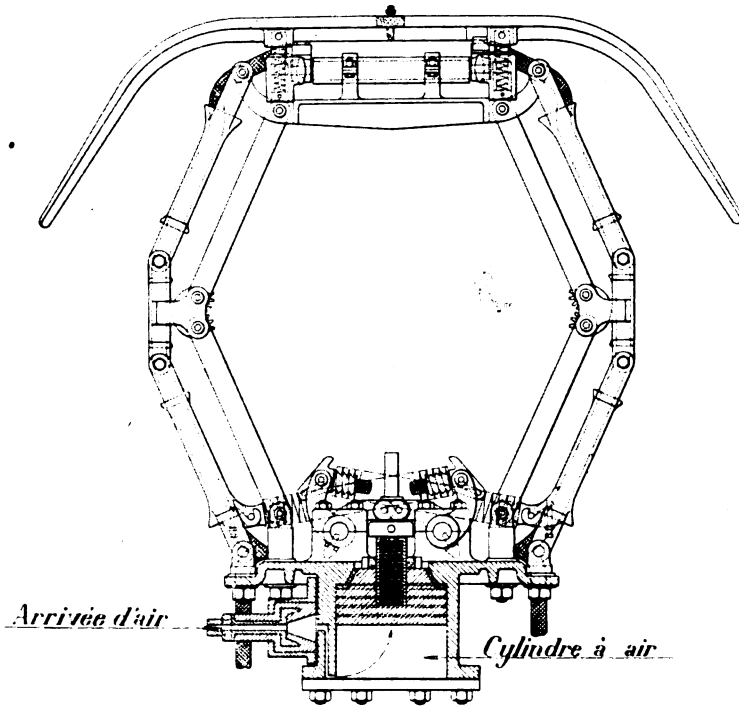


Fig. 19. — Appareil de prise de courant par archets.

ressorts principaux sont munies de deux crochets dont les becs, butant à fond de course, décrochent les ressorts et produisent le déclenchement, l'appareil s'affaissant sous son propre poids.

» Les sept premiers mois d'exploitation ont permis de se rendre compte du fonctionnement de cet appareil, qui est entièrement satisfaisant. L'usure du fil est nulle et il ne se produit aucune étincelle sous les archets. La pression d'appui a été définitivement fixée à 16 kg, soit 4 kg par frotteur, et un dernier perfectionnement a été introduit : le graissage. Sans que l'usure totale ait jamais été anormale, elle se produisait au début d'une façon irrégulière et amenait un rainurage assez rapide de la lame d'archet qui devenait inutilisable et dont la surface devait être dressée à nou-

veau. Il a suffi de pratiquer dans la longueur de l'archet une gorge qu'on garnit de graisse; la dépense de graisse est pratiquement nulle et l'usure se produit d'une façon parfaitement régulière. La vie des archets a été considérablement augmentée de ce fait; sans pouvoir encore en fixer d'une façon précise la durée moyenne,

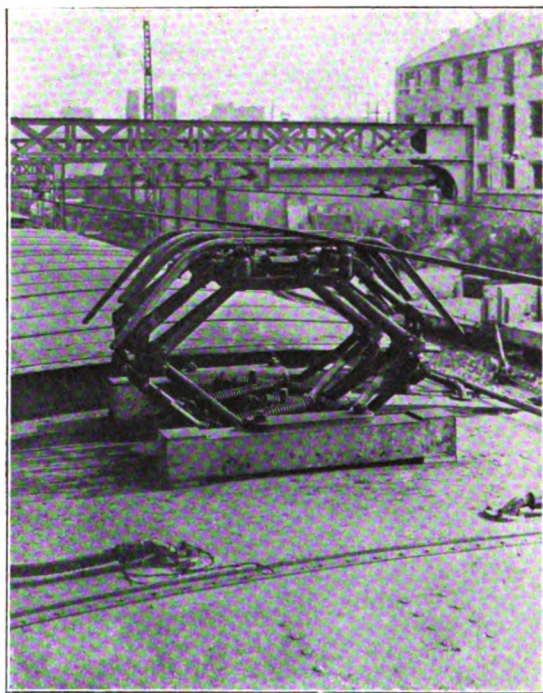


Fig. 20. — Appareil de prise de courant.

nous avons déjà des parcours kilométriques de 20000 km représentant pour l'archet qui ne fait qu'un trajet sur deux en prise avec le fil, un parcours de 10000 km. L'archet présenté est parmi ceux-là; il a fonctionné sans interruption du 3 janvier au 30 avril.

» *Appareils de contrôle.* — En ce qui concerne les dispositions de commande à distance des moteurs de traction, nous n'entrerons pas dans le détail du système, lequel est du type bien connu Sprague-Thomson; nous signalerons seulement les dispositions spéciales qui y ont été introduites pour son adaptation à la distribution spéciale à deux ponts. Ces dispositions consistent d'une part en un ensemble d'inverseurs et d'interrupteurs permettant

d'alimenter les circuits de traction, de commande et de lumière par l'un ou l'autre pont, et, d'autre part, en des enclenchements obligeant normalement à alimenter la voiture de tête par le fil, la motrice de queue par le troisième rail (*fig. 21 et 22*).

» Pour arriver à ce double résultat, on a installé dans chaque motrice les appareils représentés au schéma. Un interrupteur I bipolaire, double direction, permettant par sa branche principale de mettre le circuit des moteurs sur le pont fil ou sur le pont rail; un deuxième inverseur *j*, normalement plombé à la position haute, permet également d'alimenter les circuits de lumière et le manipulateur de commande par le fil ou par le rail; enfin la deuxième branche du gros interrupteur bipolaire I connecte la sortie d'un relais dit *relais de sécurité*, soit à la terre par l'intermédiaire du robinet de manœuvre de l'archet, soit au fil de commande; l'autre borne du relais de sécurité est connectée au fil de la ligne de train.

» Cela étant, le relais de sécurité coupant lorsqu'il n'est pas excité la commande des contacteurs principaux, le démarrage ne peut avoir lieu que s'il est levé. Il faut pour cela :

» 1^o Que, dans l'une des voitures, l'interrupteur I soit à la position haute, et que le robinet R soit à l'admission, c'est-à-dire que l'archet soit levé;

» 2^o Que, dans l'autre voiture, I soit à la position basse. S'il en est ainsi, et si de plus on manœuvre dans la première voiture le manipulateur, dès la première touche le fil 2 est en charge, un circuit se ferme par : fil 2, interrupteur I, relais de sécurité, fil 6, relais de sécurité de la deuxième voiture, interrupteur I, contacts du robinet et terre; les relais de sécurité sont excités et permettent le démarrage.

» Si, dans un cas particulier, il y a lieu de renoncer à la position normale, si par exemple il est nécessaire d'alimenter les deux voitures par un même pont, le commutateur *j* sera inversé s'il agit du pont rail et la clef *k* annulant les enclenchements décrits plus haut, puisqu'elle court-circuite les contacts du relais de sécurité, permettra encore de démarrer.

» En un mot, des enclenchements qu'un déplombage fait disparaître en cas de nécessité, ne permettent le démarrage que si :

a. Les deux motrices sont sur deux ponts différents;

- b. C'est la motrice de tête qui est sur le pont fil;
- c. La motrice de queue a son archet effectivement abattu.
- » L'alimentation des circuits de lumière se fait comme il a été

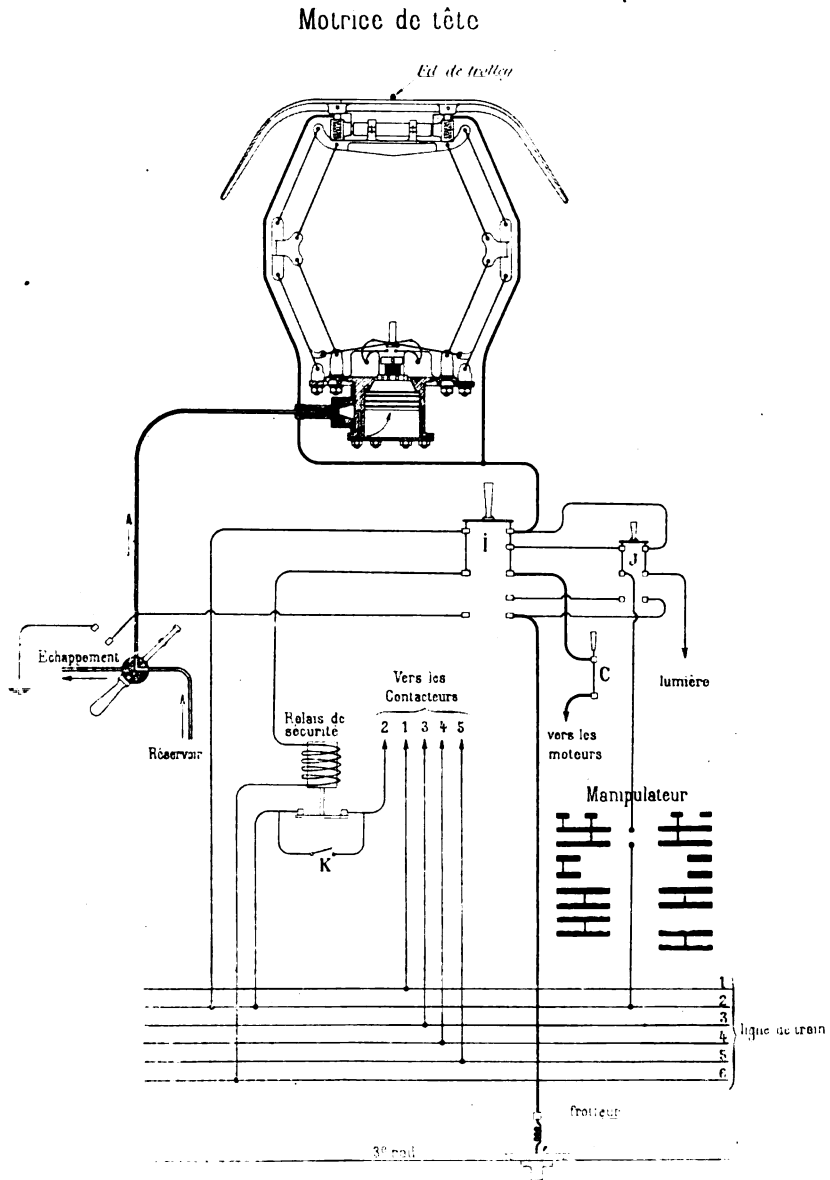


Fig. 21. — Schéma des enclenchements électriques des deux motrices d'un train.

dit plus haut dans la motrice de tête, c'est-à-dire normalement sur le pont fil, et exceptionnellement sur le pont rail. Enfin l'ali-

mentation du compresseur d'air est prise avant le couteau de traction sur ce circuit de traction; chaque compresseur est donc sur le pont de sa voiture.

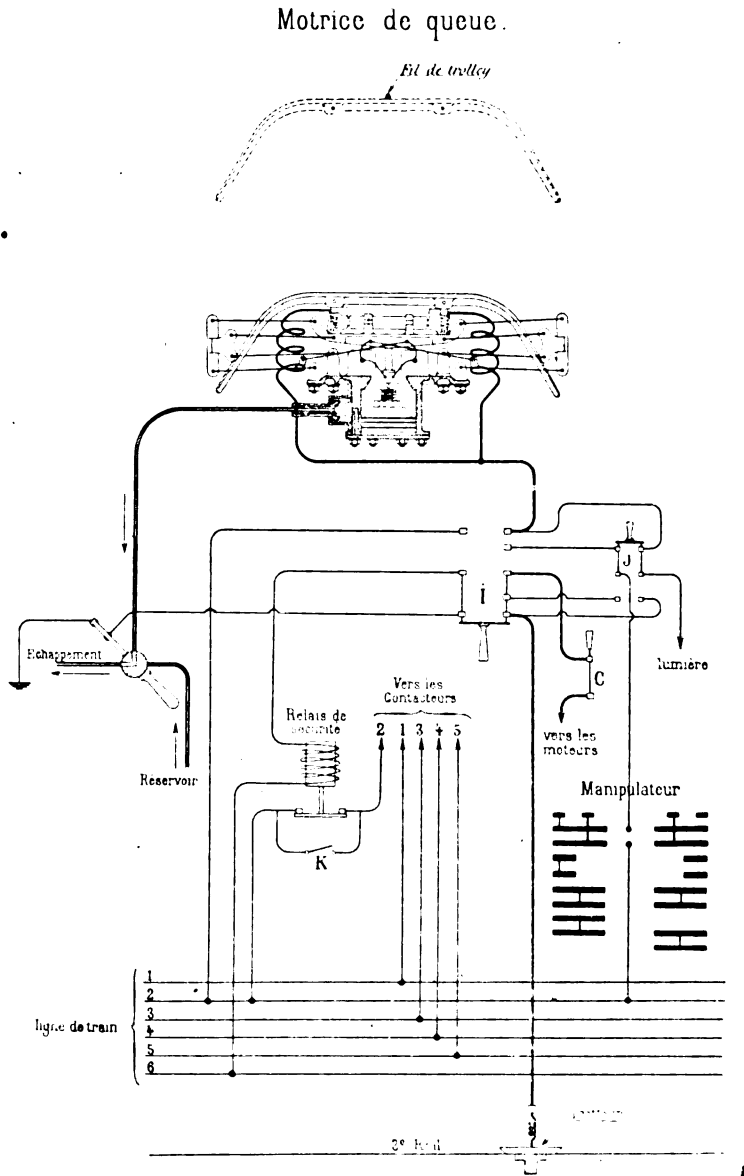


Fig. 21. — Schéma des enclenchements électriques des deux motrices d'un train.

» Les figures 22 à 28 donnent différentes vues des voitures ainsi que du dépôt et des ateliers de Vaugirard.

ALIMENTATION DU RÉSEAU.

» Pour l'alimentation électrique du réseau du Nord-Sud, on

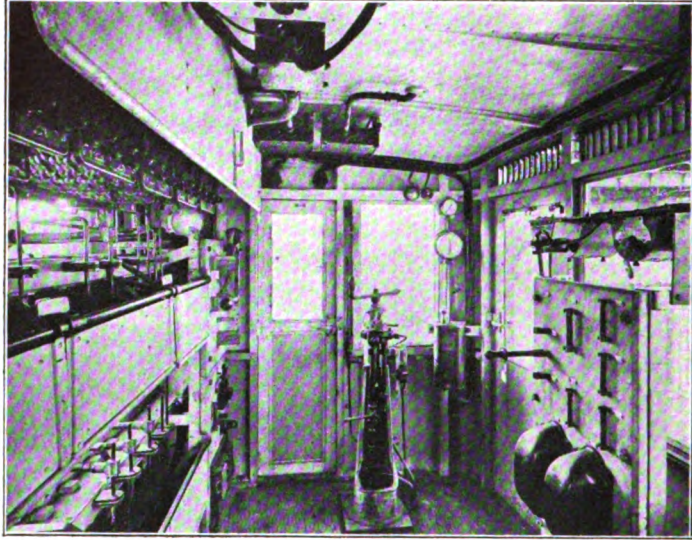


Fig. 22. — Intérieur d'une loge de voiture motrice.

pouvait soit construire une usine centrale, soit acheter le courant

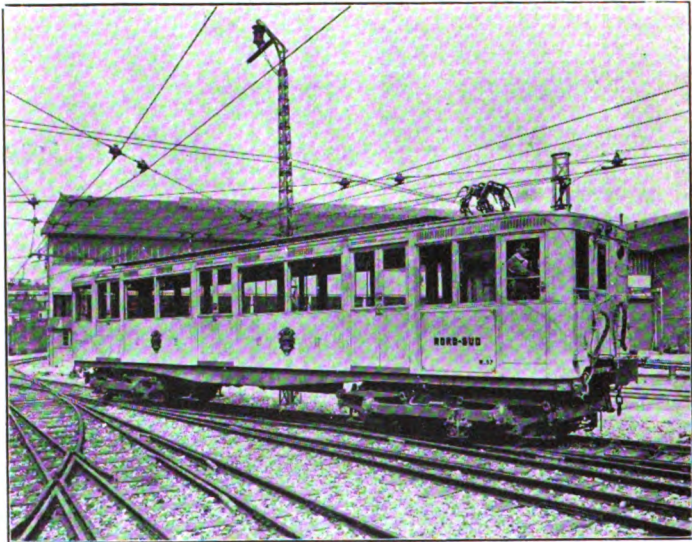


Fig. 23. — Voiture motrice.

à des usines de distribution d'énergie électrique.

» La première solution ne présentait pas d'avantage économique sur la seconde; d'autre part la nécessité s'imposait de pouvoir disposer de deux alimentations distinctes pour assurer en toutes



Fig. 24. — Voiture de 1^{re} classe.

circonstances la continuité du service. Construire deux usines eut

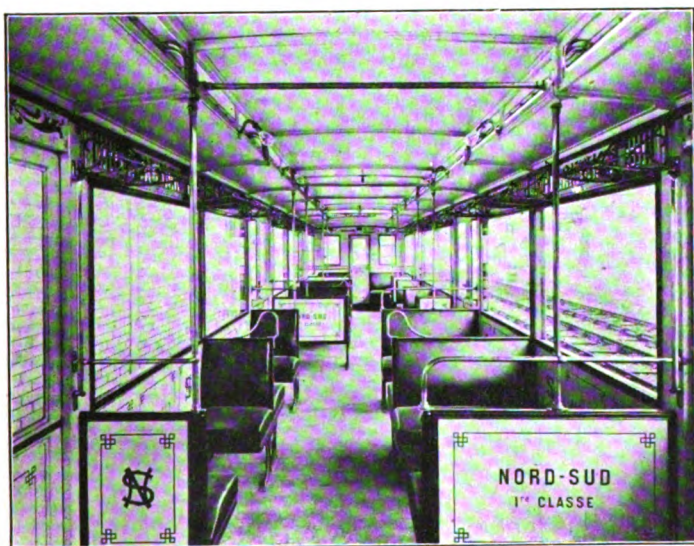


Fig. 25. — Intérieur d'une voiture de 1^{re} classe.

été trop onéreux. De même on ne pouvait songer à en construire

une alimentant seulement la moitié du réseau et acheter l'énergie nécessaire à l'autre moitié, car l'usine aurait dû pouvoir alimenter

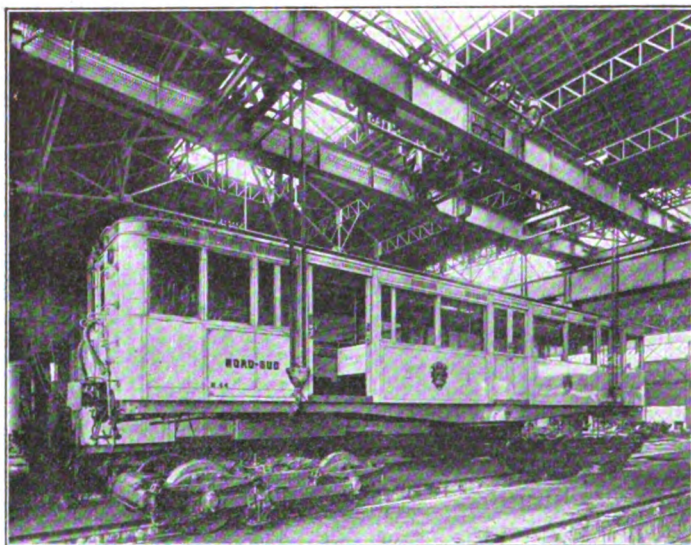


Fig. 26. — Dépôt de Vaugirard. Caisse au levage.

exceptionnellement le réseau complet. Il ne restait donc qu'une seule

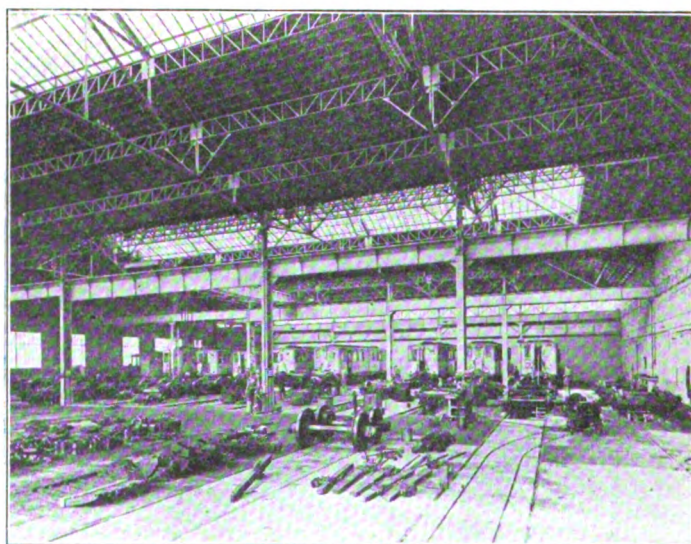


Fig. 27. — Dépôt de Vaugirard. Ateliers de montage.

solution, qui était de partager l'achat de l'énergie entre deux fournisseurs de courant, avec l'éventualité pour chacun d'eux de fournir la

totalité en cas de besoin. C'est sur ces bases qu'ont été passés les contrats entre la Société du Nord-Sud et, d'une part, la Compagnie générale de distribution d'énergie électrique (Usine de Vitry) et, d'autre part, la Société d'électricité de Paris (Usine de Saint-Denis).

» Le Nord-Sud a deux sous-stations principales : l'une dénommée *sous-station Necker* et située impasse de l'Enfant-Jésus, entre

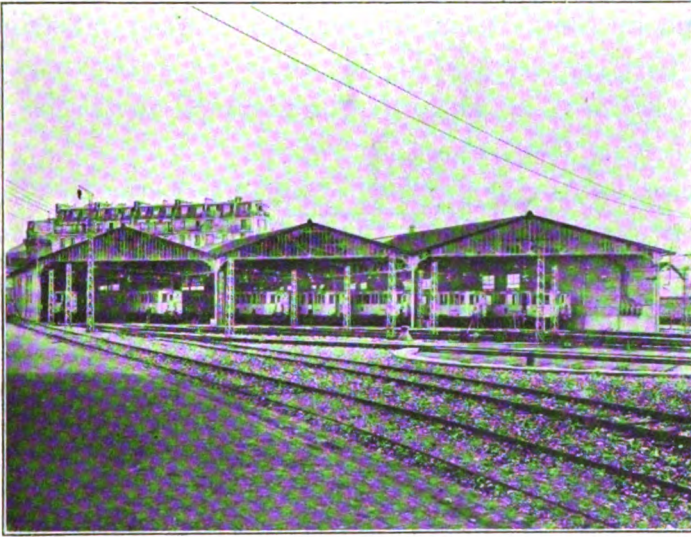


Fig. 28. — Dépôt de Vaugirard. Halle de lavage.

les stations *Pasteur* et *Falguière*; l'autre, *sous-station Tivoli*, située passage Tivoli, près de la station *Saint-Lazare*.

» La première de ces sous-stations est alimentée normalement par l'usine de Vitry, la seconde par l'usine de Saint-Denis.

» Pour arriver à l'égalisation de la puissance prise à chacune de ces sous-stations, la section de la ligne comprise entre les deux sous-stations a été divisée inégalement, le point de coupure étant la station *Concorde* à 1 km de la sous-station *Tivoli* et à 4 km de la sous-station *Necker*.

» Remarquons en passant que, quand bien même cette coupure n'aurait pas été faite dans le but d'obtenir une répartition spéciale de la puissance entre les deux sous-stations, nous l'aurions réalisée pour éviter les inconvénients de la répercussion d'un accident d'une sous-station sur l'autre. Mais il faut reconnaître qu'au point

de vue de la répartition des pointes d'intensité et de chute de tension, ce sectionnement est défavorable.

» L'usine de Vitry, qui produit du courant triphasé à 13000 volts (25 périodes), est reliée à la sous-station *Necker* par deux câbles de $3 \times 100 \text{ mm}^2$. De plus un câble de même section relie la même sous-station à la sous-station *Rennes* des Tramways Sud, qui reçoit également le courant de l'usine de Vitry par plusieurs câbles (*fig. 29*).

» L'usine de Saint-Denis, qui produit du courant triphasé à

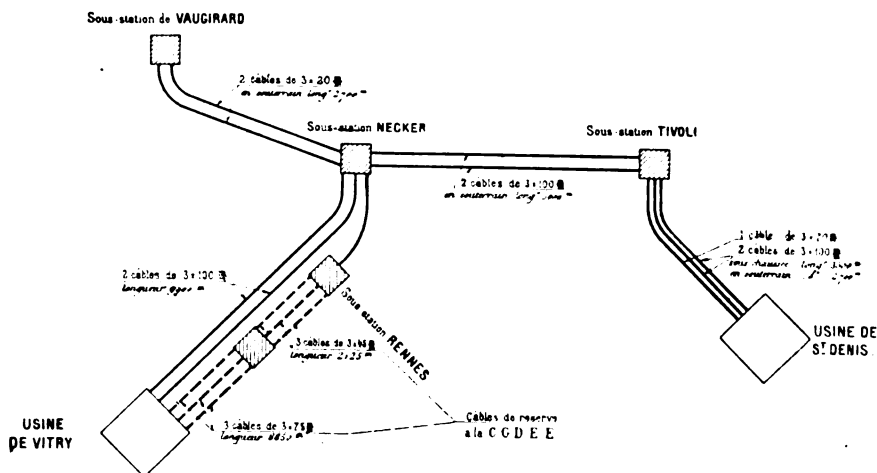


Fig. 29. — Réseau des câbles à haute tension.

10000 volts (25 périodes) est reliée à la sous-station *Tivoli* par trois câbles, dont deux de $3 \times 100 \text{ mm}^2$ et un de $3 \times 70 \text{ mm}^2$.

» Les deux sous-stations sont en outre reliées entre elles par deux câbles de $3 \times 100 \text{ mm}^2$, affectés l'un au courant à 10000 volts, l'autre au courant à 13000 volts. Un système de barrettes transportables de longueurs et de mâchoires différentes, complété par des enclenchements appropriés, permet au besoin d'affecter au courant à 13000 volts le câble normalement à 10000 volts; et réciproquement sans qu'aucune fausse manœuvre soit possible.

» Cette dernière disposition répond au cas où l'on aurait à la fois un arrêt d'une des usines et une avarie du câble transmettant normalement le courant de l'autre usine entre sous-stations.

» Le dépôt de Vaugirard possède une petite sous-station pour ses besoins propres : traction, force motrice et éclairage. Cette

sous-station est alimentée par deux câbles de $3 \times 20 \text{ mm}^2$ de section, qui la relie à la sous-station *Necker*. La sous-station du Dépôt ne peut, comme les sous-stations principales, recevoir à la fois les courants des deux usines, mais un jeu de barrettes transportables permet de l'alimenter soit en 10000 soit en 13000 volts.

» Nous avons renoncé *a priori*, pour la traction, à l'emploi d'accumulateurs, qui, en raison du système de distribution adopté, eussent conduit à une trop grande complication. Les contrats d'achat d'énergie ont été établis en conséquence. La puissance en pointe garantie est fixée à 110 pour 100 de la puissance moyenne, sur laquelle est calculé le minimum de consommation annuelle garantie.

» Le réglage des disjoncteurs est prévu pour qu'en cas de surcharge, la coupure se produise sur les tableaux à basse tension, de telle sorte qu'il n'y ait pas de mise en phase à effectuer.

» Pratiquement, les disjonctions sur le côté alternatif, après quelques mois de service, sont devenues très rares et en tout cas ne se produisent plus jamais pour de simples surcharges, mais seulement en cas de court-circuit.

» Tous les câbles à haute tension ont été essayés en usine à 40 000 volts, c'est-à-dire au triple de la tension de service.

» Les uns ont subi en outre un essai en pointe à 55 000 volts, c'est-à-dire plus du quadruple de la tension normale; d'autres échantillons ont subi en outre des essais de claquage qui ont prouvé qu'ils résisteraient au moins à 70 000 volts.

» Il était prévu des essais après pose au double de la tension de service. Par suite de la difficulté de trouver le transformateur pour effectuer ces essais, on a dû se contenter de mettre à la terre une des phases et de faire l'essai à la plus forte tension dont on pût disposer et qui atteignit pour certains essais 16 000 à 17 000 volts.

» Depuis la mise en service de ce réseau de câbles, qui atteint un développement total d'une cinquantaine de kilomètres, on a eu seulement à enregistrer trois claquages, qui ont pu être imputés soit aux suites de l'inondation, soit à un tassement de boîtes immédiatement après la pose. Sur le réseau alimenté par l'usine de Vitry, aucun limiteur de tension n'est en service. Nous avons monté des limiteurs de tension dans les sous-stations à l'arrivée des câbles,

mais leur mise en service n'a pas jusqu'à ce jour été jugée nécessaire.

» Les quelques incidents qui se sont produits sur le réseau à haute tension au début ont permis de constater des effets de surintensités considérables, mais rien n'a donné lieu de supposer qu'en aucun cas le matériel ait eu à souffrir de surtensions.

» Au voisinage de l'usine de Vitry, les câbles à haute tension du Nord-Sud passent dans un bas-fond où ils ont été immergés sous une nappe d'eau de 6 m de profondeur pendant la crue de janvier 1910. Il y eut des infiltrations dans un certain nombre de boîtes de jonction. Depuis, nous avons fait remplacer toutes les boîtes exposées à être noyées dans cette partie par des boîtes étanches constituées de la manière suivante :

» Une chemise de plomb placée à l'intérieur de la boîte en fonte est soudée aux enveloppes de plomb des deux câbles à raccorder; les deux coquilles de cette chemise sont soudées entre elles après connexion et enfin après coulage de la matière isolante, on soude un couvercle sur l'ouverture ménagée dans la chemise de plomb.

» Le câble est ainsi complètement enfermé dans une gaine de plomb sans solution de continuité.

» La même mesure a été prise pour les câbles haute tension reliant les deux sous-stations; ces câbles sont posés dans les souterrains dont une grande partie est à un niveau inférieur à celui de la nappe.

SOUS-STATIONS.

» *Dispositions générales.* — Ainsi que nous l'avons dit déjà, les deux sous-stations principales de Necker et de Tivoli ont à fournir des puissances égales.

» Il en résulte qu'elles ont la même composition.

» Chacune d'elles comporte :

- 4 groupes de transformation de traction, de chacun 1500 kw avec les transformateurs correspondants;
- 2 groupes de transformation d'éclairage de chacun 250 kw;
- 2 survolteurs de 60 kw pour éclairage;
- 1 batterie d'accumulateurs pour éclairage, de 640 ampères-heures, sous 600 volts.

» Les dispositions générales sont les mêmes. Toutefois les formes et les dimensions des terrains étant différentes, les deux sous-stations ne sont pas identiques.

» La commande à distance de tous les disjoncteurs à haute tension a permis d'adopter une disposition qui évite tout croisement au même niveau des canalisations de diverses natures, en même temps que toutes les manœuvres courantes se trouvent concentrées sur un même tableau de distribution.

» Les dispositions générales sont les suivantes (*fig. 30, 31, 32*):

» Si nous partons du souterrain nous trouvons d'abord une galerie faisant communiquer celui-ci avec la sous-station; puis, en remontant, un sous-sol à haute tension, dit *deuxième sous-sol*, un autre sous-sol à haute tension, dit *premier sous-sol*, et au même niveau, la chambre de soufflage des transformateurs, le sous-sol de la salle des machines; au rez-de-chaussée la salle des machines, avec les tableaux de distribution, ceux-ci en tout ou partie surélevés; enfin un étage pour les accumulateurs.

» Les câbles à haute tension suivent la galerie, arrivent au deuxième sous-sol qui constitue un poste de coupure et où se trouvent d'abord, en dérivation sur le circuit, les transformateurs de tension pour appareils de mesures et relais à retour de courant, les limiteurs de tension, comportant la disposition à quatre groupes de rouleaux, trois entre phases et un entre point neutre et terre; puis, en série dans le circuit et dans l'ordre de parcours du courant, une première coupure à main, le disjoncteur d'arrivée commandé à distance, les transformateurs série pour les appareils de mesure et relais, une deuxième coupure à main, manœuvrée par la même poignée que la première; enfin les barres générales.

» Celles-ci remontent au premier sous-sol à haute tension qui sert de poste de couplage pour les différents groupes de transformation. Dans ce sous-sol, en partant des barres, nous trouvons pour chaque groupe un commutateur permettant de brancher ce groupe soit sur les barres à 10000 volts, soit sur les barres à 13000 volts; le disjoncteur commandé à distance avec son transformateur série pour relais, un commutateur pour mettre le courant soit sur les connexions à 10000 volts, soit sur les connexions à 13000 volts du transformateur de tension.

» Ce commutateur est manœuvré par la même poignée que celui qui relie le groupe aux barres, de telle sorte qu'aucune fausse liaison n'est possible.

» Le courant arrive enfin aux bornes primaires des transfor-

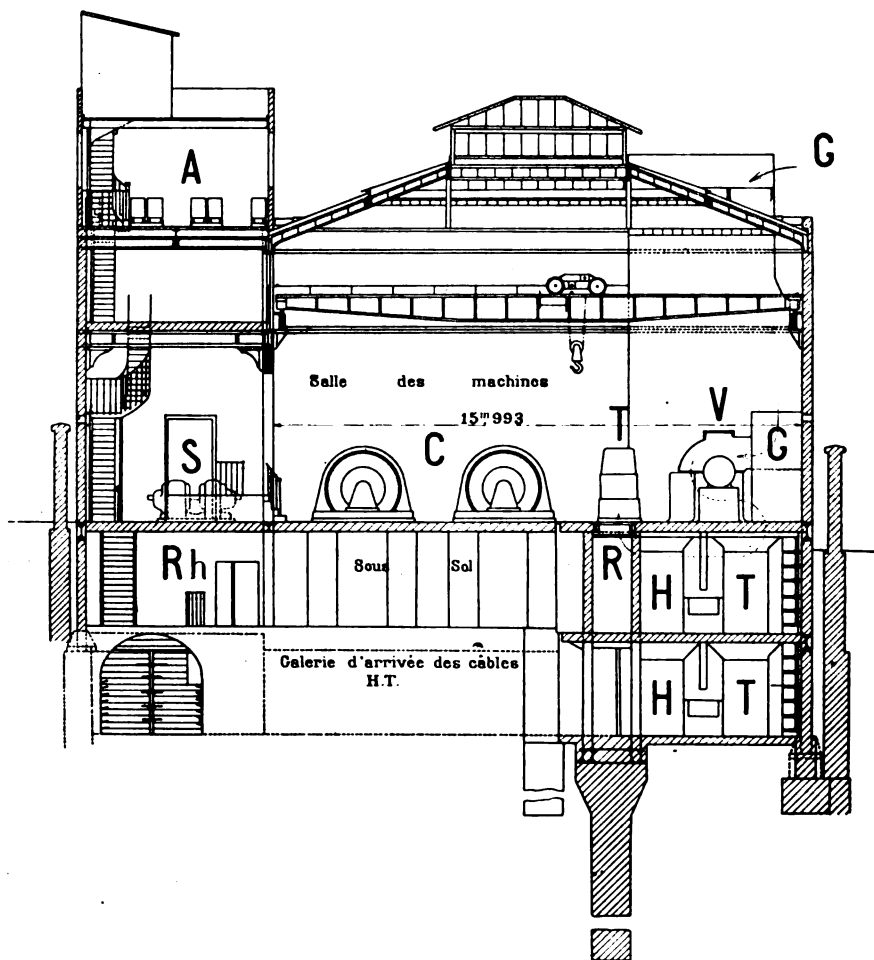


Fig. 30. — Sous-station Necker. Coupe transversale.

Légendes des figures 30, 31 et 32.

G, Commutatrices; T, Transformateurs; E, Groupes d'éclairage; S, Survolteurs; TR, Tableau principal de traction; TE, Tableau d'éclairage; V, Ventilateurs; TV, Tableau des ventilateurs; G, Gaine d'aspiration; R, Chambre de soufflage; J, Disjoncteurs à haute tension; V₁, Arrivée de feeder Vitry n° 1; V₂, Arrivée de feeder Vitry n° 2; R₃, Arrivée de feeder Rennes n° 3; TN₁, Arrivée de feeder Tivoli-Necker n° 1; TN₂, Arrivée de feeder Tivoli-Necker n° 2; Vd, Départs de feeders Vaugirard; A, Accumulateurs; Rh, Rhéostats de démarrage et d'excitation.

mateurs de tension par des câbles qui traversent la paroi de la chambre de soufflage.

» Le courant secondaire des groupes de traction sort également par des câbles qui traversent l'autre paroi de la chambre de soufflage et qui aboutissent directement aux bagues des commutatrices.

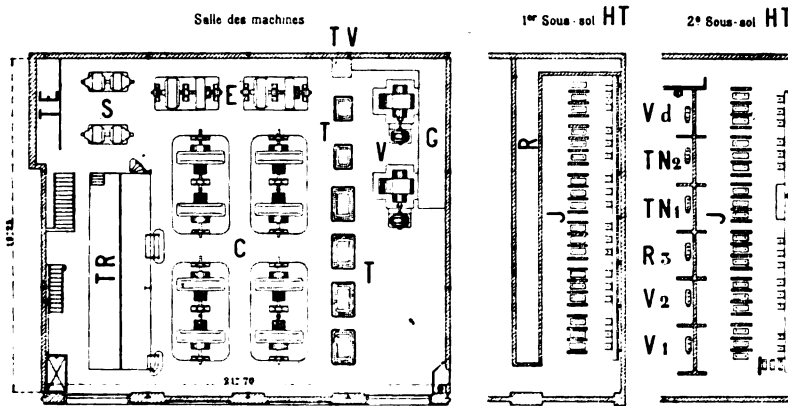


Fig. 31. — Sous-station Necker. Plan.

» Des collecteurs des commutatrices, le courant va directement au tableau de distribution par des barres nues. On voit donc que,

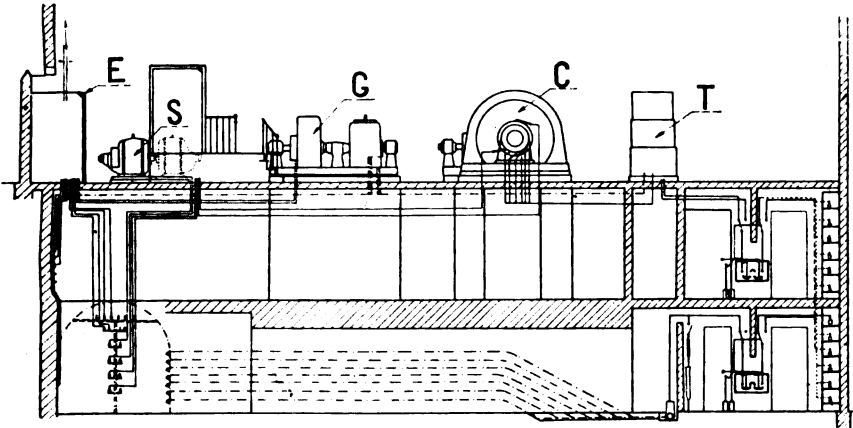


Fig. 32. — Sous-station Necker. Schéma de l'installation.

sur tout le parcours du courant, les seuls appareils de manœuvre qui ne soient pas commandés du tableau, sont les coupures à main des arrivées haute tension et les commutateurs 10000-13000 volts, tous appareils qui ne sont pas de manœuvre courante.

» Pour les groupes d'éclairage, le courant secondaire à sa sortie du transformateur rencontre d'abord une dérivation servant à

alimenter les moteurs des ventilateurs de soufflage, puis, avant d'arriver au moteur du groupe d'éclairage, un interrupteur qui permet d'isoler le groupe de son transformateur si l'on veut n'alimenter que le ventilateur.

» Cet interrupteur ne sert pas à la manœuvre courante, qui est faite du tableau en agissant sur le disjoncteur à haute tension. Les seuls appareils de manœuvre courante qui ne soient pas commandés du tableau général sont les démarreurs des ventilateurs qui sont placés sur un tableau spécial en même temps que les interrupteurs d'isolement des groupes d'éclairage, à proximité de ces groupes. Cette disposition ne constitue pas une sujétion spéciale, car la manœuvre de démarrage des ventilateurs se combine avec la mise en court-circuit des bagues des moteurs des groupes d'éclairage, laquelle exige que l'électricien se porte sur ces groupes,

» Le tableau général est divisé en deux parties : l'une, dite *tableau de traction*, comportant la commande à distance des disjoncteurs des arrivées à haute tension, les panneaux des groupes de traction et les départs de traction ; l'autre, dite *tableau d'éclairage* et comportant les panneaux des groupes d'éclairage, de la batterie, des survolteurs et des départs d'éclairage.

» Les salles de machines des deux sous-stations sont constituées par une ossature en charpente avec comble vitré, qui supporte les chemins de roulement d'un pont roulant à main de 12 tonnes. Une partie de la salle est couverte par le plancher de la salle des accumulateurs. Celle-ci est desservie par un monte-charges à main de 1000 kg.

» Tout le matériel machines a été fourni par la Société anonyme Westinghouse, et les tableaux et l'appareillage par MM. Vedovelli, Priestley et C^o.

» Telles sont les dispositions générales des deux sous-stations qu'il nous reste à compléter par la description de quelques dispositions spéciales.

» *Groupes principaux de traction.* — Les quatre groupes principaux de traction de chaque sous-station sont constitués chacun par un transformateur abaisseur et par un groupe de deux commu-

tatrices hexaphasées à 600 volts montées sur le même arbre. L'une de ces commutatrices dessert le pont fil, l'autre le pont rail. Il est utile de faire ressortir les raisons qui nous ont guidé dans le choix du nombre, de la puissance et de la disposition de ces groupes.

» Le premier principe auquel nous avons obéi est celui d'avoir une réserve égale à la puissance normalement en service. En effet, s'il se produit un court-circuit violent, provoquant le décrochage des groupes en service, il est prudent de visiter ces groupes et de nettoyer les collecteurs avant de les remettre en marche; il faut donc autant que possible être prêt à faire fonctionner un nombre de groupes complètement distincts équivalent à ceux mis momentanément en réserve. Le chiffre de quatre groupes se trouve ainsi logiquement indiqué; car, d'après le principe posé, le nombre minimum serait de deux groupes; on n'aurait ainsi aucune souplesse et la mise hors service des deux groupes, éventualité toujours à prévoir, paralyserait toute la sous-station; alors qu'il est peu vraisemblable que quatre groupes puissent se trouver ensemble indisponibles.

» Les considérations qui précèdent fixent la puissance de chaque unité, qui doit être comprise entre la puissance moyenne à fournir normalement par la sous-station et la moitié de cette puissance, la capacité de surcharge en pointes étant de 100 pour 100. La puissance moyenne à fournir pour chaque sous-station étant évaluée à environ 2000 kw, on a adopté une puissance unitaire de 1500 kw.

» Deux solutions se présentaient encore pour le choix des dispositions générales de ces unités : ou bien adopter des groupes à 600 volts pouvant être montés sur l'un ou l'autre pont, ou bien des groupes doubles composés de deux commutatrices montées l'une sur pont fil, l'autre sur pont rail. Cette dernière solution a prévalu. Elle permet en effet, de marcher en service réduit en ne mettant en ligne qu'une seule unité de 1500 kw, ou bien de faire fonctionner indépendamment deux groupes reliés respectivement à chacun des deux réseaux d'alimentation. Elle n'a d'ailleurs aucun désavantage sur la première, car les conditions de fonctionnement garanties et d'ailleurs réalisées pratiquement sont telles que chaque groupe peut fonctionner à n'importe quel écart de charge entre les deux ponts.

» Le transformateur abaisseur comporte au primaire un enroulement triphasé en étoile avec bornes à 10 000 et à 13 000 volts, et au secondaire quatre enroulements triphasés en étoile, formant deux systèmes hexaphasés, un pour chaque commutatrice. Ces dispositions ont entraîné pour le démarrage certaines conséquences qu'il est intéressant de faire ressortir.

» Le démarrage de chaque groupe de traction s'effectue au moyen du courant d'un groupe d'éclairage, mis pour cette opération sur des barres spéciales. Ce courant est amené aux balais d'une des commutatrices du groupe, qui entraîne l'autre. Or, si on laisse

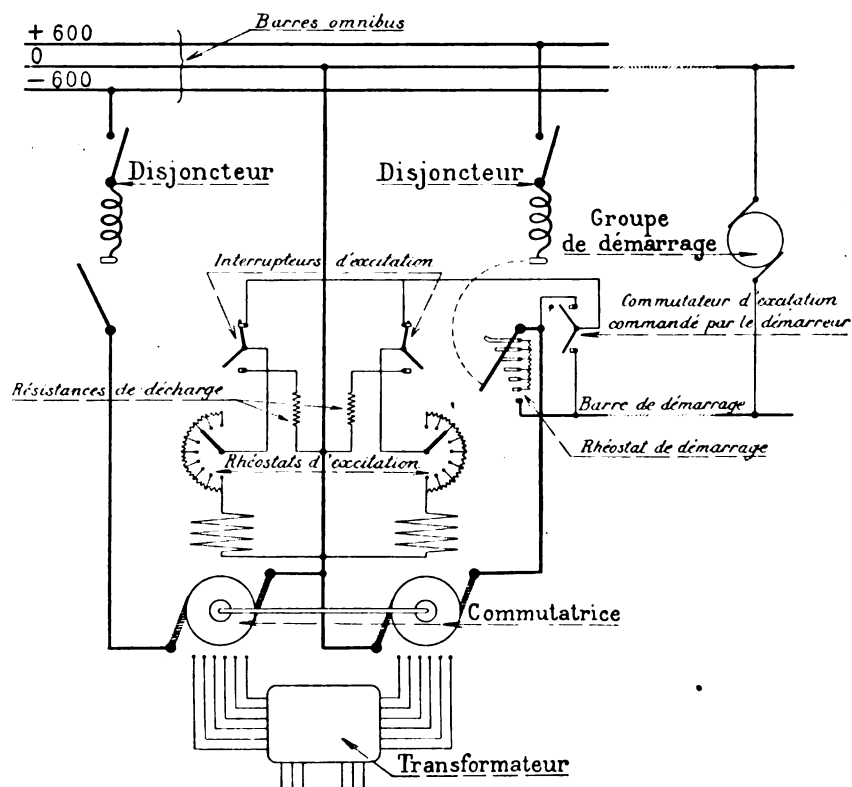


Fig. 33. — Démarrage des commutatrices.

cette seconde machine auto-excitatrice, on constate que le groupe se met bien en marche, mais qu'il ne prend pas de vitesse. Ceci tient à ce que les deux machines sont liées inductivement par les secondaires du transformateur. L'induit de la deuxième machine ayant une self-induction faible par rapport à celle du transformateur, les choses se passent comme si l'induit de cette deuxième

machine formait directement court-circuit sur la première. Il en résulte qu'elle ne s'excite pas, et l'ensemble prend une vitesse très faible proportionnelle à l'intensité de courant qu'on fournit.

» La solution de cette difficulté consiste tout simplement à exciter séparément la seconde machine, par le même courant que la première (*fig. 33*). Le démarrage s'effectue alors très franchement avec un courant de 700 à 800 ampères à la première touche du rhéostat.

» Les transformateurs sont du type à soufflage avec connexions à la partie inférieure. Les commutatrices sont à huit pôles. L'ensemble des deux induits repose sur trois paliers. L'arbre est en deux pièces assemblées par un plateau d'accouplement rigide. Le calage angulaire des deux demi-arbres a une grande importance pour le bon fonctionnement des machines. Il était toujours vérifié en usine par un essai à la plate-forme.

» *Groupes d'éclairage.* — Les groupes d'éclairage sont constitués chacun par un moteur asynchrone triphasé entraînant directement une génératrice à courant continu à pôles auxiliaires. L'arbre repose sur trois paliers. Il est en deux pièces avec accouplement rigide. La mise en route s'opère par résistances variables dans le rotor avec mise en court-circuit directe à la fin du démarrage.

» Les survolteurs sont destinés à maintenir la tension constante aux barres d'éclairage tout en permettant la charge de la batterie, et d'assurer la même constance de la tension au cas où le courant du groupe d'éclairage viendrait à manquer pour une cause quelconque. A cet effet, le survolteur comporte en plus de l'enroulement inducteur shunt deux enroulements série, l'un traversé par le courant total sortant du groupe d'éclairage, et dont l'effet s'ajoute à celui de l'enroulement shunt, l'autre traversé par le courant total allant aux lampes et dont l'effet se retranche de celui de l'enroulement shunt. L'effet de ces deux enroulements est équivalent à celui d'un seul qui serait intercalé dans le circuit de la batterie et de sens tel qu'il réduirait l'effet de l'enroulement shunt quand la batterie serait en décharge. Cette disposition avait déjà été appliquée avec succès à la sous-station d'éclairage des chemins de fer de l'État à la gare Saint-Lazare.

» Le soufflage des transformateurs est effectué par deux ventilateurs actionnés par moteurs en cages d'écureuil et dont un seul suffit à assurer le service. Le démarrage s'effectue au moyen d'un auto-transformateur. L'air est aspiré au-dessus du toit par une gaine en ciment armé, et refoulé dans la chambre de soufflage au-dessus de laquelle sont montés les transformateurs.

» *Commande électrique à distance.* — Les circuits de commande électrique, le contrôle de position des appareils et le circuit des boutons d'alarme dont nous parlerons plus loin sont alimentés par du courant continu à 110 volts. Ce courant est emprunté au nombre d'éléments convenable de la batterie d'accumulateurs au moyen du dispositif suivant qui permet de faire travailler ces

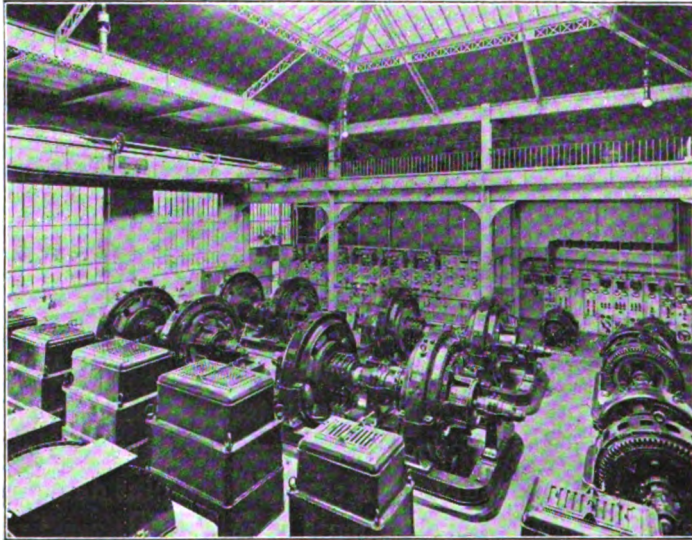


Fig. 34. — Sous-station Necker.

éléments exactement dans les mêmes conditions que les autres. Un certain nombre d'éléments sont reliés aux plots d'un réducteur qui permet de régler à la valeur voulue la tension entre la borne négative de la batterie et la manette de ce réducteur. Dans le circuit allant de la manette du réducteur aux appareils d'utilisation, est intercalé un ampèremètre avec zéro au milieu (*fig. 45*).

» Des circuits de lampes du sous-sol qui sont toujours en service,

sont intercalés entre le conducteur sortant de l'ampèremètre et la barre positive d'éclairage.

» L'intensité absorbée par ces circuits de lampes est sensiblement égale à celle prise en moyenne par les circuits de commande et l'on obtient l'égalité pratiquement absolue au moyen de quelques lampes supplémentaires mises aux bornes du circuit de commande.

» Cette égalité est constatée par l'ampèremètre, dont l'aiguille doit marquer zéro. Elle n'est rompue que pendant une fraction de seconde, au moment du fonctionnement des disjoncteurs; mais la quantité d'électricité ainsi absorbée est négligeable et certainement très inférieure aux différences de charge dues aux écarts de capacité et de rendement des différents éléments de la batterie.

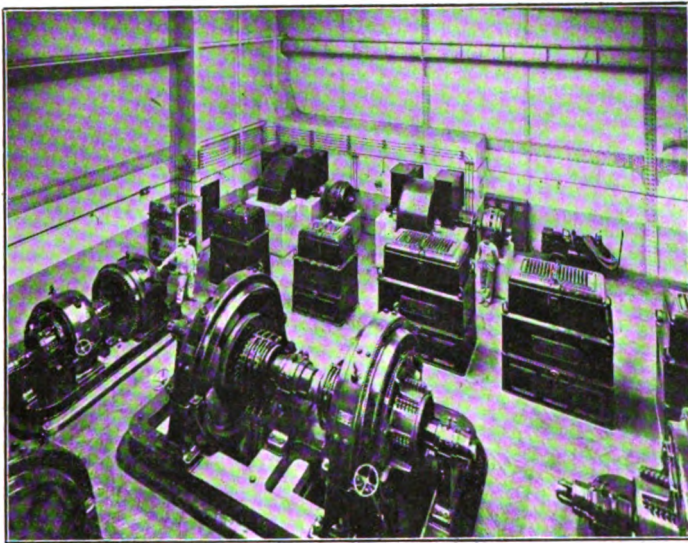


Fig. 35. — Sous-station Necker.

» *Tableaux à haute tension.* — A part quelques points spéciaux, les tableaux à haute tension sont montés en barres nues avec cloisonnements en alabastrine. Cette matière est une sorte de plâtre aluné qui se moule très facilement. Pour constituer les cloisonnements des tableaux, on prépare à l'avance des gouttières ou des plaques qu'on assemble ensuite sur place. L'isolement de ces cloisonnements est supérieur à celui obtenu avec le ciment armé.

» Les disjoncteurs à haute tension présentent quelques particularités qu'il est intéressant de signaler. Ils peuvent être mus au besoin à la main. Dans le cas de commande électrique, l'action est produite par deux électros : l'un pour la fermeture, l'autre pour l'ouverture.

» Le déclenchement à maximum est produit par un ressort toujours bandé qui n'est déclenché que par l'action d'un électro

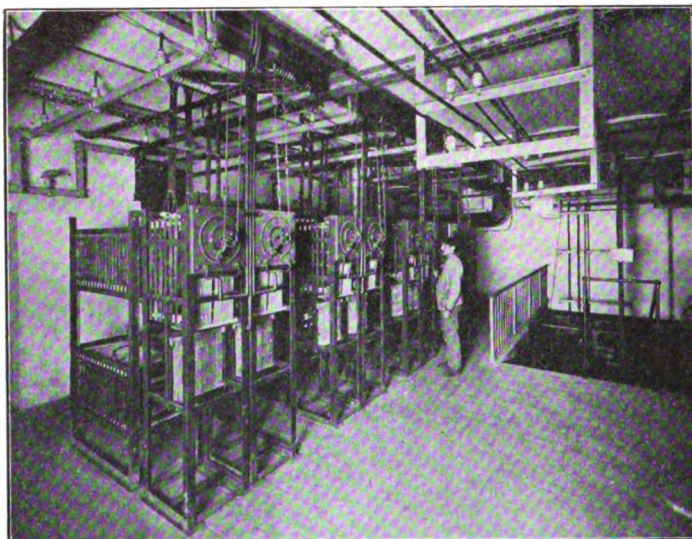


Fig. 36. — Sous-station Necker, premier sous-sol. Rhéostats.

excité par les relais. Le déclenchement est donc toujours prêt à se produire, même pendant la manœuvre de fermeture. Lorsqu'il s'est produit, pour refermer l'appareil, il faut d'abord ramener le levier de commande à la position d'ouverture, ce qui a pour effet d'armer de nouveau le ressort de déclenchement. Cette opération peut se faire à main ou électriquement. Pour la commande électrique, le tableau porte deux boutons : l'un correspondant à l'ouverture, l'autre à la fermeture. Une fois l'action commencée, un contact s'établit qui maintient le courant jusqu'à la fin du mouvement, et dispense ainsi l'opérateur de continuer à presser sur le bouton.

» La position du disjoncteur est signalée au tableau par des lampes portant les indications *ouvert*, *fermé*. Ces lampes sont intercalées dans des circuits qui se ferment par l'action d'un commu-

tateur commandé directement par le levier du disjoncteur. Le déclenchement à maximum est signalé au tableau par ce fait que les deux indications *ouvert* et *fermé* sont éclairées à la fois.

» Les relais de déclenchement sont de deux types : l'un watt-métrique à retour de puissance, appliqué aux arrivées de câbles, l'autre ampèremétrique à action indépendante du sens de passage de la puissance, appliqué aux disjoncteurs des groupes de

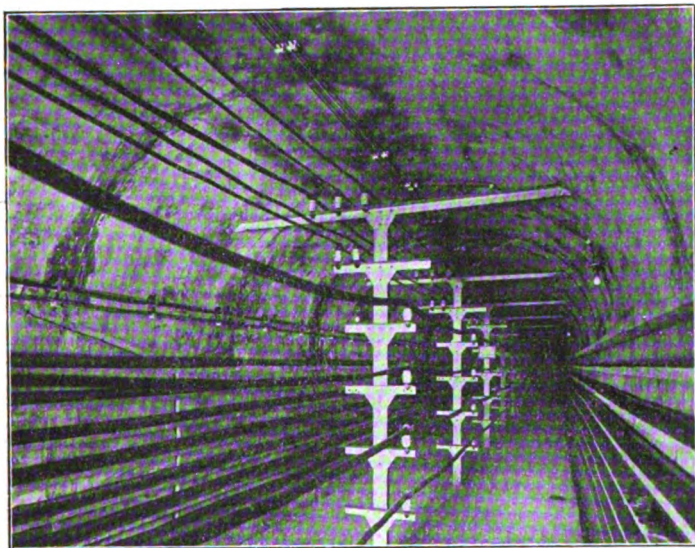


Fig. 37. — Sous-station Necker, galerie des câbles.

transformation. Ces deux types sont temporisés. Le relais watt-métrique est constitué par un moteur analogue à ceux des compteurs à champ tournant et donnant par suite un couple proportionnel à la puissance qui traverse l'appareil; le disque de ce moteur entraîne un balancier par l'intermédiaire d'un réducteur de vitesse. Lorsque le moteur tourne dans le sens direct, le balancier vient rencontrer un levier portant un poids qui arrête son mouvement tant que le couple n'est pas assez fort pour surmonter l'action de ce poids. Si le couple devient assez fort, le levier, en remontant, établit un contact qui ferme le circuit de l'électrode déclenchement.

» L'armature mobile de cet électro, en arrivant à fin de course, coupe le circuit, de telle sorte qu'il n'y a pas de rupture de courant sur les contacts des relais.

» S'il y a inversion de puissance, le sens de rotation du moteur change, le balancier rencontre un levier sans poids qui établit un contact dans le circuit de l'électro de déclenchement pour une puissance très faible.

» La temporisation est obtenue au moyen d'un frein électro-

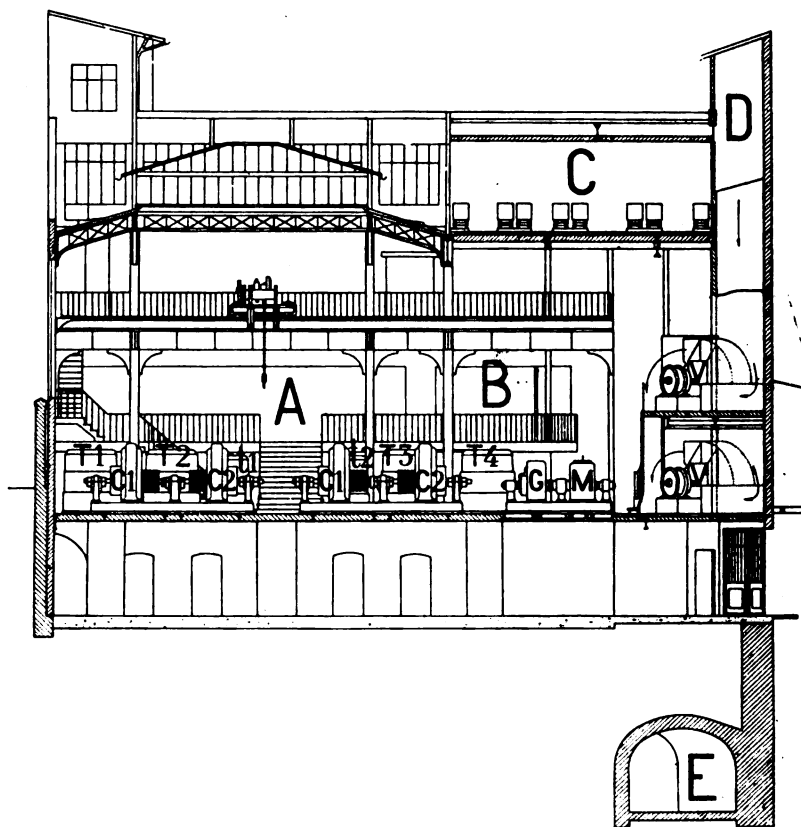


Fig. 38. — Sous-station Tivoli. Coupe longitudinale.

C₁, C₂, Commutatrice double; GM, Groupe d'éclairage; T, Transformateur de groupe de traction; t, Transformateur de groupe d'éclairage; V, Ventilateurs; A, Tableau principal de traction; B, Tableau d'éclairage; C, Accumulateurs; D, Gaine d'aspiration; E, Galerie de câbles.

magnétique constitué par un disque tournant entre les pôles d'un aimant permanent et entraîné par le moteur.

» Il y a trois relais par disjoncteur, montés sur chaque phase.

» Les dispositions des relais ampèremétriques sont analogues, mais un peu plus simples, le moteur donnant alors un couple proportionnel au carré de l'intensité et n'ayant par suite qu'un seul sens de rotation.

» L'emploi de relais à retour de puissance n'est pas ici justifié, comme il l'est le plus souvent, par la préoccupation d'éviter le renvoi à l'usine génératrice de courant provenant par transformation inverse d'une batterie d'accumulateurs. Il s'est trouvé indiqué par le fait de la présence de plusieurs câbles pouvant être mis en parallèle et ne présentant pas de dérivation sur leur parcours. On évite ainsi d'alimenter par un de ces câbles un court-circuit

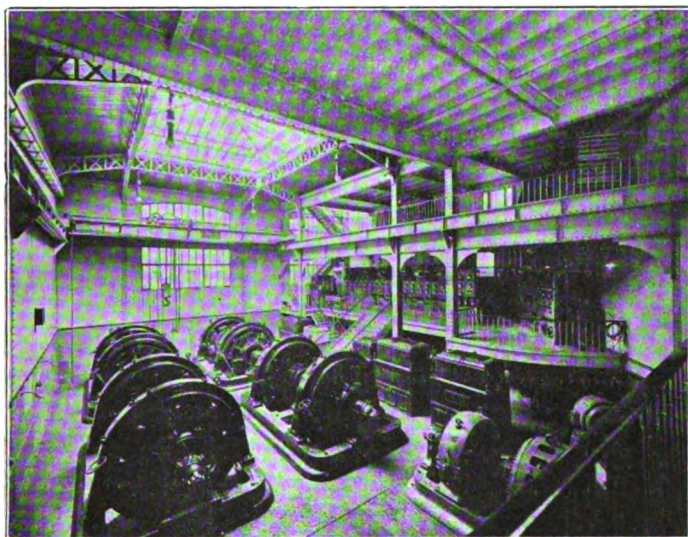


Fig. 39. — Sous-station Tivoli.

qui se produirait sur un autre, après l'action du disjoncteur commandant celui-ci à l'usine, et, de plus, si un court-circuit se produit, on a plus de chances de discerner de suite le câble avarié.

» Chaque disjoncteur est enclenché avec les coupures ou commutateurs à main correspondants, de telle sorte que ces coupures ne puissent être manœuvrées que lorsque le disjoncteur est ouvert, et qu'inversement on ne puisse fermer le disjoncteur que si les coupures sont placées dans une position définie. Pour les coupures des arrivées, ces positions sont les deux extrêmes : coupure complètement ouverte, ou coupure complètement fermée. Pour les commutateurs 10000-13000 volts des groupes de transformation, en plus des deux positions extrêmes 10000 et 13000 volts, la position milieu permet la manœuvre du disjoncteur. On peut ainsi vérifier à tout instant le fonctionnement de celui-ci.

» Des voyants lumineux placés sur le Tableau indiquent si le commutateur est placé dans la position 10000 ou dans la position 13000.

» Nous n'insisterons pas sur les détails de l'installation haute tension dont la description nous entraînerait très loin.

» Cette partie de l'installation est surtout caractérisée par la préoccupation d'empêcher *a priori* toutes les fausses manœuvres

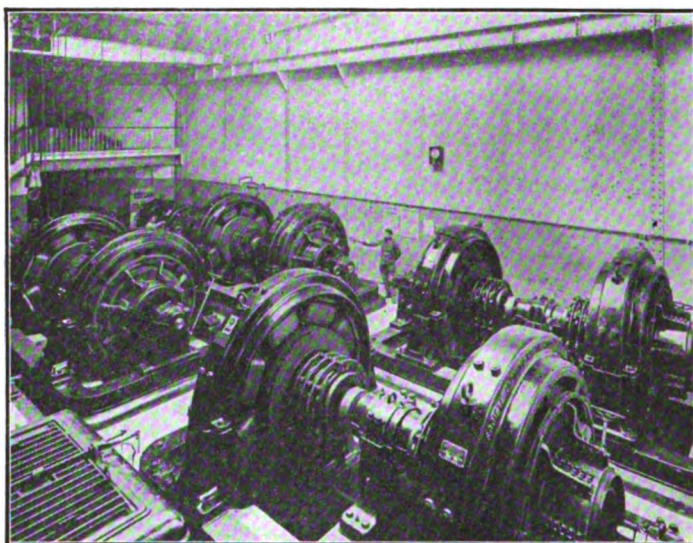


Fig. 40. — Sous-station Tivoli.

possibles. C'est l'application d'une des deux seules théories admissibles, l'autre consistant au contraire à se reposer entièrement sur la responsabilité de l'opérateur. L'expérience des premiers mois d'exploitation ne nous a d'ailleurs laissé aucun regret à ce sujet, ce qui prouve que la réalisation du principe posé est satisfaisante.

» *Tableaux à basse tension.* — Comme pour les tableaux à haute tension, nous ne pouvons entrer dans tous les détails des tableaux à basse tension; nous en signalerons seulement les particularités les plus intéressantes :

» Les panneaux de manœuvre des disjoncteurs à haute tension, d'arrivée ou de départ de câbles, comportent pour chaque câble les deux boutons et les deux signaux lumineux dont nous avons parlé, groupés de telle sorte que chaque bouton soit placé sous le

signal lumineux indiquant le résultat de la manœuvre correspondante; *ouvert*, *fermé*. La disposition adoptée est très pratique. Les signaux lumineux se voient de loin et les disjoncteurs fermés se distinguent de suite par la couleur rouge du signal.

» Tous les disjoncteurs du tableau de traction, en outre des dispositions générales déjà connues des disjoncteurs à réenclenchement empêché de MM. Vedovelli Priestley et C^{ie}, présentent

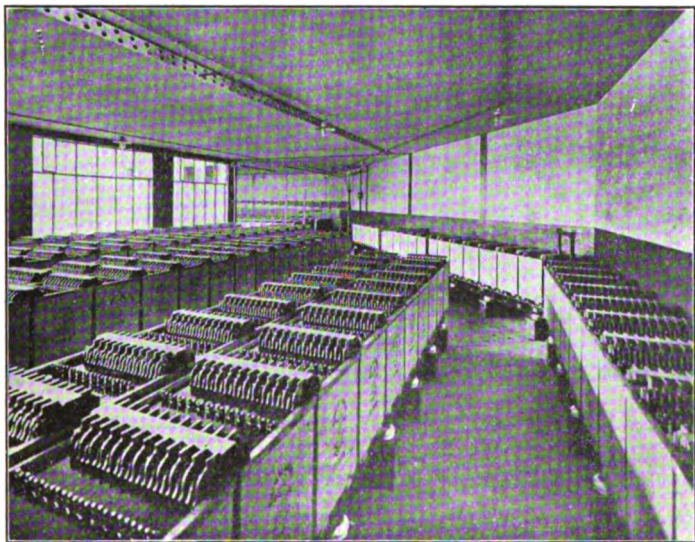


Fig. 41. — Sous-station Tivoli. Accumulateurs.

une particularité intéressante. Ils ont trois lames à ressort portant des charbons qui viennent en contact successivement : le premier contact intercale dans le circuit une résistance de 2 ohms en série avec un électro provoquant le déclenchement pour une intensité un peu inférieure à 300 ampères; en cas de court-circuit sur la ligne, le disjoncteur déclenche ainsi, pour une faible intensité, avant même d'avoir été fermé.

» Chaque groupe de traction comporte trois panneaux : les deux extrêmes correspondant aux appareils à courant continu, l'un pour le pont fil, l'autre pour le pont rail; celui du milieu comporte les appareils à courant alternatif et ceux correspondant à l'excitation des commutatrices. Sur le panneau de gauche, qui correspond au fil, se trouve un disjoncteur à maxima et à minima par relais polarisé, un ampèremètre et un voltmètre, et le démarreur.

» Ce démarreur mérite une description plus détaillée (*fig. 33*). Il est monté sous forme d'inverseur, la position basse constituant le démarreur proprement dit. Le couteau en s'abaissant entraîne

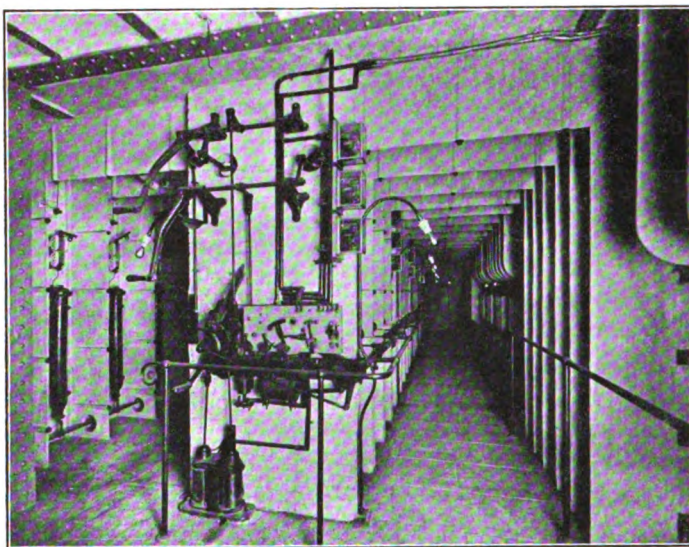


Fig. 42. — Sous-station Tivoli, deuxième sous-sol à haute tension.

un doigt qui ferme d'abord le circuit d'excitation sur les barres de démarrage.

» Le circuit de fermeture du disjoncteur haute tension passe par deux contacts qui ne sont reliés que quand on a poussé le couteau jusqu'au dernier plot de démarrage. Cette disposition a pour but d'éviter que, par suite d'une erreur de boutons, on ne couple une commutatrice non démarrée. Quand, après synchronisation et couplage, on remonte le couteau dans sa position supérieure, le doigt est entraîné de telle façon que le circuit d'excitation se trouve mis aux bornes de la commutatrice sans avoir été coupé.

» Le panneau de droite correspondant au pont rail comporte les mêmes appareils que celui de gauche à cela près que le démarreur est remplacé par un simple interrupteur à couteau.

» Les appareils de synchronisation, synchroniseur, lampes de phase, voltmètre, sont rassemblés sur une potence placée à l'extrémité droite du tableau. Un signal lumineux également placé sur cette potence indique si la broche a bien été placée dans la position correspondant à 10000 ou à 13000 volts.

» A la gauche du tableau, se trouve une autre potence portant un ampèremètre totalisant l'intensité du courant pris par l'un des ponts, un ampèremètre avec zéro au milieu sur le conducteur

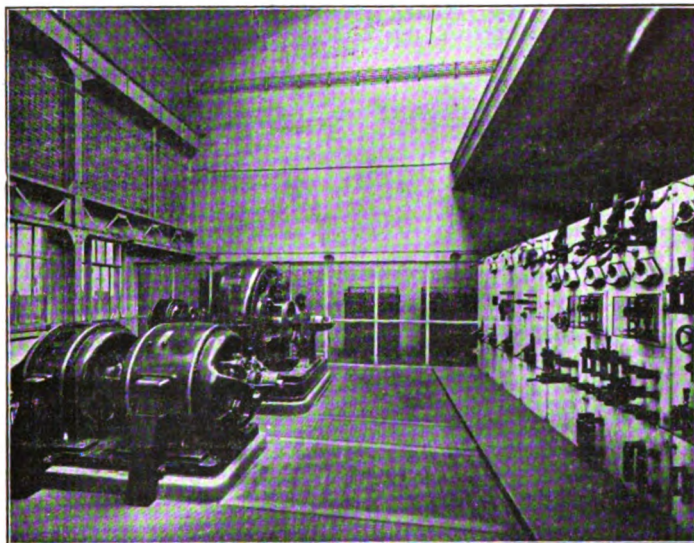


Fig. 43. — Sous-station du dépôt de Vaugirard.

de retour, et deux voltmètres montés respectivement sur chaque pont. Ces appareils, de grandes dimensions, permettent de suivre d'un seul coup d'œil le fonctionnement de la section alimentée par la sous-station.

Les figures 34 à 43 représentent différentes vues des sous-stations.

INSTALLATIONS ÉLECTRIQUES DU SOUTERRAIN.

» *Éclairage du souterrain.* — Pour des motifs de sécurité que l'on conçoit bien, l'emploi des batteries d'accumulateurs étant indispensable, nous n'avons pu adopter en principe, pour l'éclairage du souterrain, d'autre système que celui en usage à la Compagnie du Métropolitain de Paris, établi du reste en conformité des règlements spéciaux édictés par le service du Contrôle.

» Cet éclairage comporte en principe l'emploi de deux circuits distincts à 600 volts dits *éclairage normal* et *éclairage de secours*, passant par toutes les galeries souterraines, en comprenant chacun environ la moitié du nombre total des lampes, réparties par cir-

cuits de 5. Quelques innovations ont toutefois été apportées, soit comme nous l'avons indiqué plus haut dans le mode de production du courant d'éclairage aux sous-stations, soit dans les dispositions des tableaux de station ou les détails des circuits.

» Dans chaque station se trouve un tableau de distribution pour l'éclairage normal et un pour l'éclairage de secours, chacun d'eux alimentant l'éclairage d'un quai de la station, de la moitié de l'accès et d'une partie du souterrain de part et d'autre de la station. Ces tableaux sont placés dans des chambres aménagées spécialement à cet effet dans les piédroits du souterrain et qui ont approximativement une surface de 2,50 m sur 2,50 m (*fig. 5 et 44*).

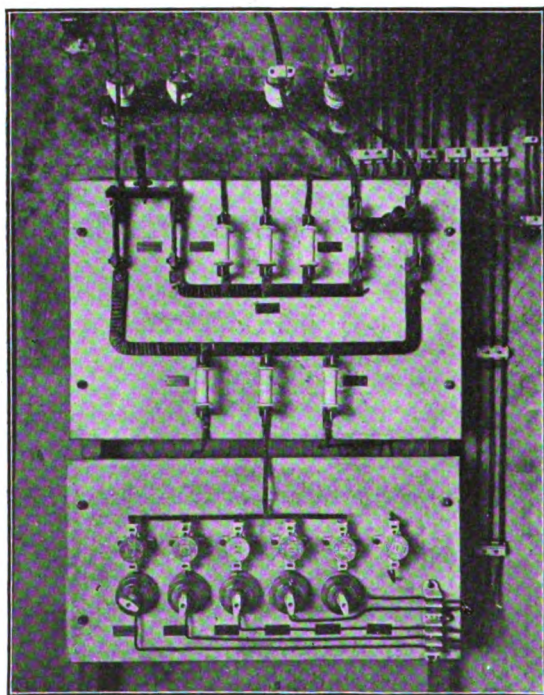


Fig. 44. — Tableau d'éclairage.

Chaque tableau comporte, en plus des interrupteurs et coupe-circuits des départs, deux interrupteurs permettant d'isoler une section de feeder en cas de réparation. Les interrupteurs de départs n'ont de réellement nouveau que la construction des couvercles qui présentent la particularité originale d'être en verre vissant sur porcelaine. Les coupe-circuits en porcelaine sont au contraire d'un modèle tout à fait nouveau. Ils sont à bouchon portant deux

couteaux venant se prendre dans deux mâchoires. La construction en est faite sur gabarit, ce qui rend les pièces parfaitement interchangeables et assure un contact excellent. Le coupe-circuit peut être placé n'importe comment sans que le bouchon risque de tomber. C'est en un mot une excellente réalisation du coupe-circuit de faible intensité à 600 volts. Ces tableaux sont construits par la maison Brandt et Fouilleret.

» Les chambres dont nous avons parlé plus haut ne servent pas uniquement aux tableaux d'éclairage. Elles renferment également les tableaux de relais et les armoires à piles des signaux.

» Celle d'éclairage normal contient en outre, les postes de disjonction.

» Nous avons commencé des essais au moment où les lampes à filament métallique devenaient d'un emploi pratique et d'un prix abordable. Un double problème se posait : régularité de fabrication permettant la mise en série des lampes; prix d'achat et durée conduisant à une dépense non supérieure à celle des lampes à filament de carbone. Il a suffi de poser la première question pour qu'elle soit résolue; à la condition de remplacer méthodiquement les séries de lampes. Quant à la seconde, l'expérience des premiers mois d'exploitation semble démontrer qu'elle est également résolue avec le bénéfice de 50 pour 100 de lumière de plus que par l'emploi de lampes à filament de carbone. Nous croyons toutefois devoir signaler que dans le cas particulier où la durée d'éclairage est grande et le prix du courant relativement bas, il y a intérêt à ne pas rechercher une consommation spécifique trop faible et à se contenter de 1,3 à 1,4 watt par bougie.

» *Boutons d'alarme.* — Pour la sécurité des voyageurs qu'on peut être amené à évacuer à pied par le souterrain et en général pour toute cause urgente obligeant à couper le courant de traction, le service du contrôle a exigé, des chemins de fer Métropolitain et Nord-Sud, l'installation d'un circuit spécial passant par tous les points accessibles au public dans le souterrain et sur lequel sont montés des boutons d'alarme placés, en principe, tous les 100 m. En agissant sur ces boutons on coupe le courant à la sous-station sur la zone intéressée.

» Le circuit des boutons d'alarme du Nord-Sud a été réalisé par MM. Vedovelli, Priestley et C^{ie} sur un principe nouveau et avec des détails intéressants (*fig. 45*).

» Le principe est le suivant :

» Supposons un circuit résistant, fermé sur une source constante, pile ou batterie d'accumulateurs, et comprenant deux bobines d'un disjoncteur, l'une à maxima, l'autre à minima. Si l'on met en court-circuit une partie de la résistance, l'augmentation d'intensité produit le déclenchement à maxima. S'il y a rupture du fil, la suppression du courant produit le déclenchement à minima. Supposons maintenant que la résistance soit répartie le long d'une ligne établie dans le souterrain, par fractions montées à chaque poste de bouton d'alarme et qu'on puisse établir un court-circuit par la fermeture de chacun de ces boutons. L'intensité du courant dans le circuit sera fonction de la position du bouton sur lequel on aura agi. Il suffira donc de monter un ampèremètre dans le circuit pour pouvoir reconnaître, de la sous-station même, le point du souterrain d'où l'on a coupé le courant.

» Le fonctionnement du disjoncteur coupe le circuit des boutons d'alarme qu'un interrupteur permet de refermer pour la lecture de l'ampèremètre. Un voyant spécial indique que le fonctionnement du disjoncteur a été provoqué par un bouton. Chaque bouton est à deux positions : l'une normale ouverte, l'autre fermée.

» Quand on provoque la disjonction, on laisse le bouton fermé tout le temps nécessaire, puis on le remet dans la position normale. L'électricien du tableau qui surveille l'ampèremètre sait alors qu'il peut refermer le disjoncteur. Chaque bouton est enfermé dans une boîte en fonte avec glace qu'on brise quand on veut provoquer le déclenchement.

» Chaque circuit passe par les deux disjoncteurs, pont rail et pont fil, de la section considérée, de telle sorte que le courant soit coupé à la fois sur le fil et sur le rail.

» La présence de la bobine à minima avertit la sous-station que le circuit des boutons d'alarme est coupé. Dans ce cas, l'électricien du tableau cale l'armature de la bobine à minima pour pouvoir refermer le disjoncteur et avise le service d'entretien de l'avarie survenue.

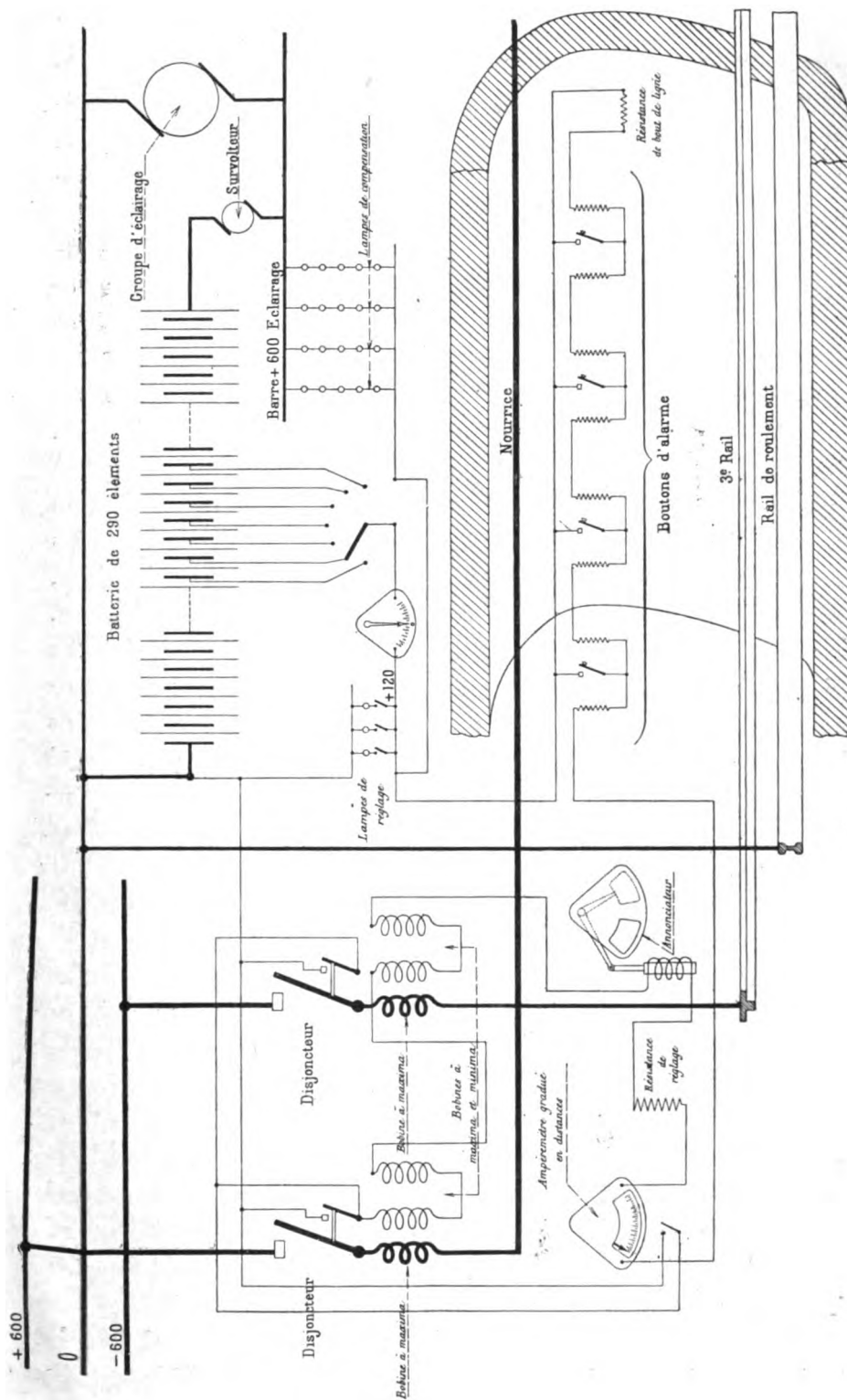


Fig. 45. — Schéma du circuit des boutons d'alarme.

» *Signalisation.* — Le système de signalisation adopté sur le Nord-Sud, tout en se conformant aux principes généraux précédemment adoptés en particulier sur le Métropolitain, comporte, tant au point de vue du cantonnement que du système d'actionnement, quelques particularités qu'il importe de signaler.

» Le block Nord-Sud est un block normalement fermé, c'est-à-dire dans lequel tous les signaux normalement rouges ne se mettent successivement au blanc devant un train, qu'autant que la situation des trains précédents le permet; c'est d'autre part un block à section neutre, c'est-à-dire dans lequel tout train est séparé de celui qui le précède par un ensemble de deux signaux, mais c'est ici qu'intervient la première particularité. Pour en apprécier l'intérêt, il y a lieu de rappeler que dans une exploitation métropolitaine où l'espacement le plus réduit à obtenir entre trains correspond sensiblement à l'intervalle entre stations consécutives, on est amené à munir en général chaque station de deux signaux, un poste d'entrée, un poste de sortie; si l'on applique à des signaux ainsi répartis le principe de la section neutre, on arrive nécessairement à ce résultat que tout train arrêté bloque tous les trains qui le suivent dans la situation correspondante à la sienne. Arrêté en station, il bloque tous les trains en station; arrêté en souterrain il bloque également en souterrain tous les trains qui le suivent. C'est contre un tel résultat, si souvent choquant pour le voyageur arrêté à l'entrée d'une station dont il aperçoit le quai libre, qu'on a voulu réagir. Que le premier train suivant le train en détresse puisse pénétrer en station et, par le jeu même de la section neutre, tous les trains suivants entrent également en station. S'il faut une dérogation au principe de la section neutre, il suffit qu'il en ait y une; il suffit que le premier train trouve un signal le laissant entrer en station; il faut en un mot à l'entrée de la station un signal permissif.

» Le signal d'entrée comporte alors en plus des feux normaux blanc, rouge, un troisième feu vert qui s'allume lorsqu'un train se présente à l'entrée de la station, alors que le train précédent n'a pas encore atteint la station précédente. Mais ce signal vert ne doit servir qu'à laisser entrer le train en gare, et non à diminuer la couverture du train précédent; le signal rouge auquel il s'est substitué subsiste, mais se trouve reporté à la sortie de la station

où il vient se superposer aux deux feux normaux de ce poste.

» En un mot, chaque entrée de gare comporte un signal pouvant présenter un feu blanc, un feu rouge ou un feu vert; chaque sortie comporte un signal pouvant présenter un feu blanc, un feu rouge ou deux feux rouges.

» Un train se présentant au signal d'entrée le trouve rouge, si le train précédent est en station; vert si le train précédent est entre la station et la station aval; blanc si le train précédent est dans la station aval ou au delà.

» Un train se présentant au signal de sortie le trouve double rouge si le train précédent est entre la station et la station aval; simple rouge si le train précédent est dans la station aval; blanc si le train précédent est au delà de la station aval.

» On voit en un mot que, si le principe de la double couverture est conservé, la section tampon, qui est effectivement d'un intervalle de station pour un train en station, se comprime pour le cas du train en souterrain; pour répondre à une objection qui aurait pu se présenter mais que l'expérience n'a pas confirmée, nous ferons observer que, si le train est autorisé à se rapprocher de celui qui le précède, il doit d'abord marquer l'arrêt devant le signal vert, et s'avancer ensuite à vitesse réduite dans une station dans laquelle il doit obligatoirement s'arrêter.

» En ce qui concerne l'actionnement du block par le passage du train, nous n'avons employé, au Nord-Sud, ni la pédale mécanique, ni la barre de contact électrique, nous avons préféré le circuit de voie qui ne présente ni les difficultés de réglage de la pédale mécanique, ni les chances de raté de la pédale électrique en cas de manque de courant, et qui devait se trouver sur le Nord-Sud dans des conditions particulièrement favorables, en raison de l'isolement relativement bon de la voie de roulement et de l'importance minime des courants de retour dans cette voie.

» Le circuit de voie d'actionnement se compose de deux coupons de rails isolés de la voie courante et entre eux par trois joints isolants; à chaque joint l'isolement est réalisé par une cale entre les deux abouts de rails, deux plaques entre les rails et les éclisses mécaniques, et des canons autour des boulons : la cale, les plaques et les canons sont en fibre grise (*fig. 46*).

» Entre chacun des coupons r et r' et la file continue sont branchés une batterie de piles et un relais; le relais est normalement excité; au passage du train, l'essieu court-circuitant la pile fait tomber le relais. On obtient ainsi au passage du train, pour les chutes et les relevages successifs des deux relais, trois combinaisons

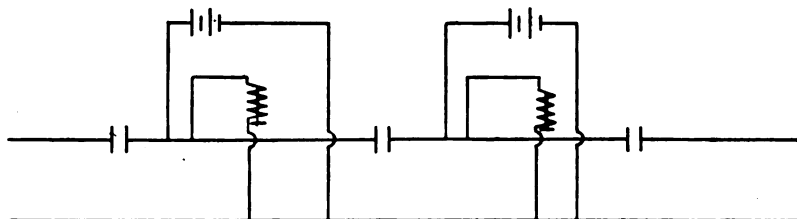


Fig. 46. — Schéma d'un circuit de voie.

utilisées chacune pour produire une action spéciale sur les circuits du block; en particulier, le déblocage du signal arrière n'est donné que par la combinaison R relevé R' tombé, c'est-à-dire par la queue du train; on obtient ainsi, sans aucun décalage du signal par rapport à la pédale, la protection constante de la queue du train par deux signaux.

» Nous n'insisterons ni sur les circuits mêmes du block trop complexes, et qui ne présentent aucune disposition particulière, ni sur l'alimentation de ces circuits réalisée par des batteries de piles au sulfate de cuivre; nous signalerons seulement que, dans les gares, l'ensemble de l'installation, tableau des relais et batteries de piles, a été réunie dans les chambres dont il a été déjà question plus haut; ces chambres, bien éclairées et munies d'une prise d'eau, permettent de réaliser l'entretien des piles dans des conditions qui en réduisent les inconvénients.

» *Enclenchements.* — Trois points du réseau ont été munis de tables d'enclenchements; ce sont : le terminus de la Porte de Versailles qui, bien que situé hors des voies en exploitation, présentait une importance particulière en raison des manœuvres de rebroussement, de garage et de relations avec le dépôt (fig. 47);

» Le raccordement des deux lignes A et B à la gare Saint-Lazare;

» La bifurcation de la Fourche où se détachent du tronc commun, venant de la gare Saint-Lazare, les deux branches de Saint-Ouen actuellement en exploitation et de Clichy en construction.

» *Manœuvre des aiguilles.* — En tant que réalisation pratique, la commande des aiguilles est du type Taylor; l'aiguille est ma-



Fig. 47. — Table d'enclenchement du terminus « Porte de Versailles ».

nœuvrée par une roue à came entraînée par un petit moteur série; lorsque l'aiguilleur agit sur le levier en table, il est arrêté par un verrou à une position intermédiaire qui ferme le courant du moteur; celui-ci manœuvre l'aiguille qui en fin de course inverse, par le jeu d'un commutateur, les connexions de l'induit et de l'inducteur du moteur; ce dernier tourne donc sur sa vitesse acquise en génératrice et renvoie à la table un courant de contrôle qui dégage le verrou et permet d'achever la course du levier.

» *Moyens mécaniques d'ascension.* — Des moyens mécaniques d'ascension sont prévus dans certaines stations, où la différence de niveau entre les quais et le sol dépasse 12 m.

» A la station de la place *Pigalle*, on mettra en service prochainement deux escaliers mécaniques du système Hocquart, dont les dispositions ne diffèrent pas sensiblement de celles des derniers appareils du même système mis en service récemment. Les différences de niveau sont de 5,12 m de palier à palier pour l'escalier inférieur, et de 6,56 m pour l'escalier supérieur, soit au total 11,68 m. Ces appareils sont mus par des moteurs électriques qui absorbent

pour l'ensemble des deux escaliers 14 kw à vide et 21 kw à la charge normale de 100 kg par marche.

» A chacune des stations *Abbesses* et *Lamarck*, seront installés des ascenseurs électriques du type Otis bien connu, de chacun 60 places, pourvus de tous les dispositifs de commande, de réglage et de sécurité indiqués par l'expérience des ascenseurs des tubes de Londres. La hauteur d'ascension est de 23 m à la station *Abbesses* et de 18 m à la station *Lamarck*. Ces ascenseurs prendront ou déposeront les voyageurs au niveau de l'un des quais et auront un arrêt intermédiaire pour les voyageurs venant ou à destination de l'autre quai.

QUELQUES DONNÉES D'EXPLOITATION.

» J'en ai terminé, Messieurs, avec la description de l'ensemble des installations.

» Il me reste maintenant à vous montrer quelques résultats pratiques obtenus en exploitation, notamment en ce qui concerne la répartition de l'énergie entre les deux ponts et l'importance du rôle de la voie de roulement comme conducteur d'équilibre.

» Voici d'abord quelques indications sur les consommations spécifiques :

» Aux bornes des moteurs, sur le profil de la portion de ligne *Porte de Versailles-Notre-Dame-de-Lorette*, la consommation est de 56 watts-heures par tonne kilomètre à vide et de 62 watts-heures en charge, par tonne kilomètre de matériel à vide.

» Aux bornes de sortie des sous-stations, la consommation rapportée au même tonnage, est de 68,8 watts-heures.

» Si l'on tient compte de ce que ce dernier chiffre comprend, en plus des pertes en ligne, l'énergie absorbée par l'éclairage des trains et les compresseurs d'air des voitures, on voit que ces résultats sont parfaitement comparables à ceux obtenus sur d'autres lignes présentant des conditions de profil et de trafic analogues, bien que le rayon d'action des sous-stations alimentant le réseau ait été augmenté.

» Nous vous avons exposé par quels moyens nous arrivons à équilibrer les intensités prises sur les deux ponts. Le courant

résiduel dans les rails de roulement n'est pas toutefois rigoureusement nul pour les raisons suivantes :

» En premier lieu, les circuits de commande et d'éclairage étant pris sur le pont fil, celui-ci a systématiquement une charge un peu supérieure à celle du pont rail. Mais la différence qui résulte de cette disposition est faible : 60 ampères environ par sous-station.

» Nous n'insisterons pas sur les écarts d'intensité entre les deux ponts pouvant résulter des différences de tension, car les dispositions adoptées rendent celles-ci très faibles. Des écarts plus importants pouvaient résulter de différences entre les caractéristiques des moteurs de la voiture de tête et de ceux de la voiture de queue. Nous vous avons indiqué les efforts faits en vue de l'unification de ces caractéristiques.

» Les résultats pratiquement obtenus dans cette voie conduisent à estimer à environ 70 ampères l'écart maximum d'intensité qu'on peut prévoir entre les motrices d'un train, en supposant rigoureusement identiques les vitesses des moteurs de ces deux motrices.

» La probabilité la plus grande est qu'il y ait autant de trains donnant sur chacun des ponts un écart en plus que de trains donnant un écart en moins. Il n'y a donc, dans le circuit de retour, qu'une intensité oscillant continuellement autour de zéro.

» Nous avons dit plus haut que nous avions admis que les vitesses des moteurs des deux motrices d'un même train étaient les mêmes. Ceci n'est pas rigoureusement exact. En dehors de l'usure inégale des bandages, il peut en effet se produire un patinage différent en tête et en queue du train.

» Enfin, une dernière cause de déséquilibre consiste en ce que les réglages des relais de contrôle des deux motrices d'un train ne sont pas rigoureusement identiques, et ne donnent pas, au même instant, le passage sur une même valeur de résistances. Cette dernière cause peut être facilement éliminée en mettant les deux voitures motrices sous le contrôle d'un relais d'accélération unique et commun aux deux motrices. Cette disposition est très facile à réaliser par une modification du schéma des circuits de contrôle et a été appliquée avec succès sur un train d'essai. Au total, on constate qu'à chaque sous-station, l'intensité dans le circuit de retour oscille de 200 à 300 ampères environ en plus ou en

moins autour d'une intensité moyenne constante, correspondant à l'éclairage des trains, laquelle est, comme nous l'avons dit, de l'ordre d'une soixantaine d'ampères.

» Les courbes que nous vous présentons (fig. 48) illustrent ce

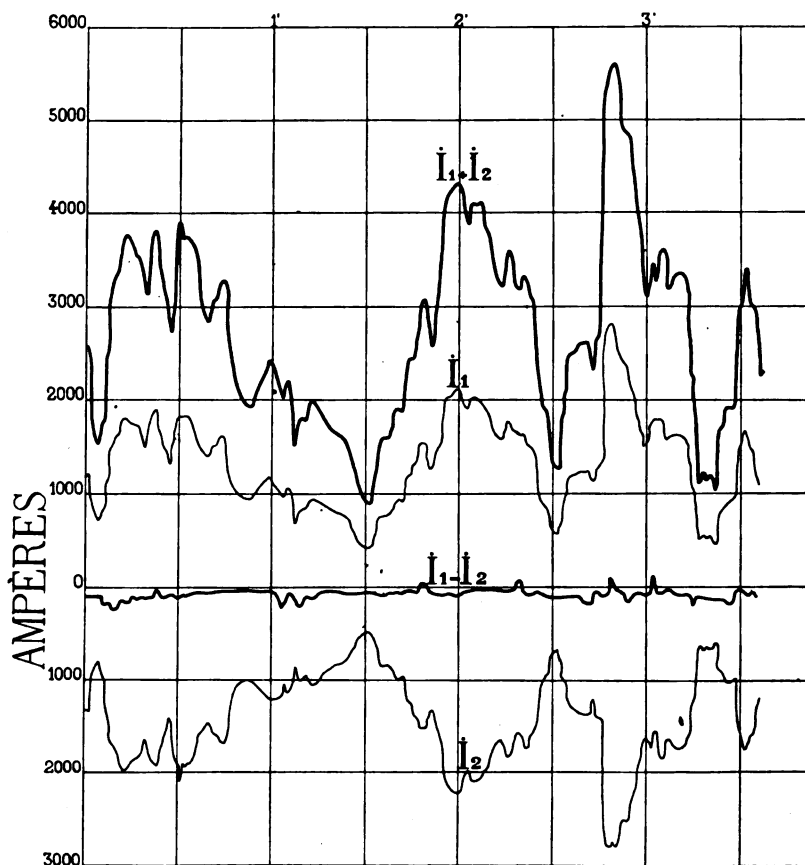


Fig. 48. — Diagrammes d'intensités.

résultat. Elles ont été relevées à la sous-station Tivoli au moyen d'enregistreurs branchés sur les shunts des ampèremètres de la puissance totalisatrice. Les courbes de I_1 (intensité dans le pont rail) et de $I_1 - I_2$ (intensité dans le circuit de retour) sont la transcription exacte des relevés d'ampèremètre. On en déduit graphiquement la courbe de I_2 , intensité dans le pont fil, et celle de $I_1 + I_2$, intensité qui serait ramenée à la sous-station par les rails de roulement si tous les trains fonctionnaient sur pont unique. La comparaison des courbes de $I_1 - I_2$ et de $I_1 + I_2$ est le criterium du résultat obtenu dans la voie que nous nous étions tracée

en étudiant le système spécial que nous avons appliqué au Nord-Sud.

» Si nous interprétons numériquement ces graphiques, nous obtenons les résultats suivants :

Ordonnée moyenne de la Courbe I, obtenue par planimétrage ..	1 333
Intensité moyenne, Courbe I ₂	1 409
Intensité totale	2 742 ampères
Courbe I ₁ — I ₂ , intensité moyenne.....	76 ampères
Soit : 2,85 pour 100.	

On voit donc que, pratiquement, l'équilibrage est réalisé à moins de 3 pour 100 près, dans l'exemple que nous mettons sous vos yeux, en y comprenant les courants d'éclairage des trains et de commande des appareils de contrôle.

» Ce résultat nous paraît justifier à lui seul les dispositions spéciales que nous avons adoptées.

» Nous signalerons enfin que l'existence de deux conducteurs d'alimentation pouvant se suppléer l'un à l'autre en cas de défaillance de l'un d'eux, confère à l'exploitation une sécurité dont l'expérience des premiers mois de service nous a permis d'apprécier toute la valeur.

» Toutes ces installations ont été réalisées en collaboration avec nos collègues de la Société internationale des Électriciens, MM. BLACHÉ et GUERY, Ingénieurs de l'Omnium Lyonnais de chemins de fer et tramways, sous la haute direction de M. BECHMANN, Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées, directeur général du chemin de fer Nord-Sud de Paris.

» C'est encouragés et soutenus par la confiance qu'il nous accordait, que nous avons pu aborder, avec des méthodes nouvelles, la solution du problème intéressant de traction électrique qui nous était confié. Nous tenons à lui en exprimer ici toute notre reconnaissance.

» Il me reste, Messieurs, à vous remercier de la bienveillante attention que vous avez bien voulu m'accorder au cours de cette Communication. »

M. le Président remercie M. Petit de l'exposé si complet qu'il a bien voulu faire des très intéressantes installations électriques du « Nord-Sud ».

La séance est levée à 11 h 55 m du soir.

BIBLIOGRAPHIE.

Distribution d'énergie électrique. — *Loi du 15 juin 1906 et règlements annexes.* 1 vol., Ch. Béranger, Paris, 1911.

Publié avec l'agrément et le concours du Ministère des Travaux publics, cet Ouvrage reproduit *in extenso* le texte des lois et règlements émanant des Pouvoirs publics et relatifs à la loi du 15 juin 1906 sur la distribution d'énergie électrique; c'est-à-dire, outre la loi fondamentale, tous les décrets, règlements, arrêtés et circulaires la complétant, édictés par le Ministère des Travaux publics, des Postes et des Télégraphes, le Ministère du Travail et de la Prévoyance sociale et le Ministère des Finances, plus divers autres documents visant la même question.

Il est bien inutile, après ce bref énoncé, de souligner tout l'intérêt que présente, pour les ingénieurs, les constructeurs et les directeurs d'établissement, ce groupement complet des règles officielles sur les installations et la distribution d'énergie, règles que d'incessants progrès en la matière tendront évidemment à modifier par la suite, ainsi, du reste, que l'ont fait ressortir les discussions récentes auxquelles a donné lieu, devant la Société internationale des Électriciens, l'interprétation à donner à certains articles de l'arrêté du 21 mars 1910, déterminant les conditions techniques des distributions d'énergie électrique ⁽¹⁾.

L'année électrique, électrothérapie et radiographique ; par le D^r FOVEAU DE COURMELLES. 1 vol., Ch. Béranger, Paris, 1911.

Dans ce onzième Volume de son *Année électrique*, le D^r Foveau de Courmelles résume, en de rapides aperçus, tous les faits d'électricité qui se sont produits au cours de 1910 et, plus particulièrement, ceux qui ont trait à la pratique médicale. Dans la plupart des cas, les sources d'information sont indiquées tant pour abrégér les descriptions ou exposés que pour permettre au lecteur de s'y reporter.

Traité juridique de l'Industrie électrique. — *Manuel pratique de législation, réglementation et jurisprudence en matière de production et distribution d'énergie électrique ;* par MM. P. ISTE et E. LEMONON. 1 vol., Marchal et Godde, Paris, 1911.

Cet Ouvrage présente un Tableau méthodique et complet des prescriptions légales qui réglementent l'établissement et le fonctionnement des entreprises d'électricité.

Rédigé sous une forme essentiellement pratique, il est destiné à rendre service, non

⁽¹⁾ Voir *Bulletin mensuel*, n^{os} de juillet, novembre et décembre 1910.

seulement aux juristes qui s'occupent de ces questions spéciales, mais surtout aux industriels, aux administrateurs, aux services municipaux, etc.

En dehors d'un exposé très clair du régime légal des distributions d'énergie électrique, tel qu'il résulte des règlements récents, on trouvera, dans l'Ouvrage de MM. Istel et Lémonon, l'étude de toutes les questions de droit qui se rapportent à la production, à la fourniture et à la consommation de l'électricité.

Moteurs électriques à courant continu et leurs dispositifs de commande. — *Propriétés dynamiques (couple, vitesse, puissance) suivant le type du moteur et de la commande. Principes du choix et du réglage suivant la nature des appareils actionnés*; par P.-J. DENIS, ingénieur de l'artillerie navale, ancien professeur à l'École des Officiers canonniers. 1 vol. in-8° avec nombreuses figures.

Cet Ouvrage, comme son titre l'indique, se réfère particulièrement à l'étude des dispositifs de réglage et de mise en marche des moteurs à courant continu et de leurs caractéristiques dynamiques.

Manuel de l'Ingénieur. — *Mathématiques. Mécanique. Physique et Chimie. Résistance des matériaux. Connaissance des Matières. Parties de machines. Machines motrices. Machines de travail. Science des mesures. Construction. Ventilation et chauffage. Distribution de l'eau. Drainage des villes. Construction des routes. Statique des constructions. Construction des Ponts. Construction des navires et machines de navires. Technologie des chemins de fer. Sidérurgie. Technologie électrique. Fabrication du gaz.* Nouvelle édition française du Manuel de la Société Hütte, traduit par L. DESMAREST, membre de la Société des Ingénieurs civils de France, directeur de papeteries. 2 beaux volumes solidement reliés en cuir plein, dorés en tête, de plus de 1300 et 900 pages de texte respectivement, avec plus de 1200 figures dans le texte.

Formulaire de l'Électricien et du Mécanicien de E. HOSPITALIER, 25^e édition, 1911, par G. Roux, expert près le tribunal civil et le tribunal de commerce de la Seine, directeur du bureau de contrôle des installations électriques, 1 vol. in-16 de xii-1261 pages, MASSON et C^{ie}, éditeurs.

La 25^e édition du *Formulaire* bien connu des Électriciens comporte un certain nombre d'additions et de remaniements relatifs aux questions ayant été l'objet de progrès récents, notamment à propos des moteurs thermiques, des lampes à arc à électrodes de mercure, des lampes à incandescence.

Le Chapitre de la jurisprudence a été mis à jour pour l'année 1910.

LISTE DES OUVRAGES

OFFERTS A LA SOCIÉTÉ INTERNATIONALE DES ÉLECTRICIENS

(Suite.)

La Bibliothèque est ouverte aux Membres de la Société, tous les jours,
de 3 heures à 6 heures, excepté les dimanches et jours de fêtes,
12, rue de Staël.

France.

- Dictionnaire pratique de Mécanique et d'Électricité*, par Charles BARBOT.
2^e édition, revue corrigée et considérablement augmentée. Paris, S. Geisler,
1911; 1 vol. in-8°, cartonné toile. (*Don de l'éditeur.*)
- Éclairage (L') électrique*. Conférences faites les 9 et 16 novembre 1910 à
l'École supérieure des Postes et Télégraphes par F. LAPORTE. Paris,
A. Dumas, 1910; une brochure in-8°. (*Don de l'auteur.*)
- Installations électriques de distribution d'énergie de la Société « L'Énergie
électrique du Centre »*, par MM. GIROS et LOUCHEUR. Paris, Imprimerie
Gauthier-Villars, 1911; 1 vol. in-8° broché. (*Don des auteurs.*)
- Navigation (La) sous-marine*, par Charles RADIGUER. Paris, O. Doin et fils,
1911; 1 vol. grand in-18 Jésus, cartonné toile (*Encyclopédie scientifique*).
(*Don des éditeurs.*)
- Propagation sur une ligne télégraphique du courant dû à une force électro-
motrice constante*. Note de M. J.-B. POMEY. Paris, Imprimerie Gauthier-
Villars, 1911; une brochure in-4° (Extrait des *Comptes rendus de l'Acadé-
mie des Sciences*). (*Don de l'auteur.*)

Étranger.

- Détermination expérimentale de la variation d'inertie des corpuscules ca-
thodiques en fonction de la vitesse*, par C.-E. GUYE et S. RATNOWSKI. Genève,
Société générale d'Imprimerie, 1911; une brochure in-8°. (Université de
Genève. Laboratoire de Physique : 2^e série, 12^e fascicule.) (*Don de M. E.
Guye.*)
- Die Schutzvorrichtungen der Startstromtechnik gegen atmosphärische Ent-
ladungen und Überspannungen*, von Dr. GUSTAV BENISCHKE. Zweite erweiterte
Auflage. Braunschweig, Fr. Vieweg und Sohn, 1911; 1 vol. in-8° broché
(Collection *Elektrotechnik*, in einzel Darstellungen Heft.). (*Don des
éditeurs.*)
-

BULLETIN
DE LA
SOCIÉTÉ INTERNATIONALE
DES
ÉLECTRICIENS.

SOMMAIRE.

Compte rendu de la réunion mensuelle de juillet 1911 : Admission de membres titulaires, p. 364. — Membres décédés, p. 364. — Observations sur les mesures magnétiques industrielles (**M. Armagnat**), p. 365. — Nouvel oscillateur à étincelles soufflées et électrodes tournantes de MM. F. Ducretet et E. Roger (**M. E. Roger**), p. 391.

BIBLIOGRAPHIE, p. 397.

OUVRAGES OFFERTS, p. 398.

COMPTE RENDU

DE LA

RÉUNION ORDINAIRE MENSUELLE

du mercredi 5 juillet 1911 ⁽¹⁾.

PRÉSIDENCE DE M. BRUNSWICK, VICE-PRÉSIDENT.

La séance est ouverte à 8 h 40 m du soir.

Le procès-verbal de la dernière réunion mensuelle est adopté.

Il est donné connaissance des Ouvrages offerts à la Biblio-

(1) La Société n'est pas solidaire des opinions émises par ses Membres dans les discussions ni responsable des Notes ou Mémoires publiés dans le *Bulletin*.

thèque de la Société (*voir* p. 398) et des demandes d'admission suivantes :

Bax (Louis-Joseph-Jules), Électricien à la *Maison Harlé et Cie*, 10, quai des Célestins, à Paris. — Présenté par MM. Harlé et A. Bochet.

Loubat (Jean-Joseph), Éditeur, 161, boulevard Voltaire, à Paris. — Présenté par MM. Chaumat et Bureau.

Vaillaux (Émile-Louis), Ingénieur à la *Société lyonnaise de Mécanique et d'Électricité*, 70, rue de Lourmel, à Paris. — Présenté par MM. Mazen et Pataud.

Ces candidats sont élus membres titulaires de la Société internationale des Électriciens.

M. le PRÉSIDENT fait part des décès de MM. *Escalante* et *Graves*; il en exprime les regrets de la Société.

L'ordre du jour appelle les Communications techniques.

OBSERVATIONS SUR LES MESURES MAGNÉTIQUES INDUSTRIELLES.

M. H. ARMAGNAT. — « Les mesures magnétiques industrielles ne présentent rien de réellement nouveau en ce moment : elles n'ont fait, dans ces dernières années, que les progrès qui résultent d'applications de plus en plus étendues, les limites mêmes des mesures se sont reculées chaque jour et les méthodes et les appareils qui suffisaient autrefois se voient éliminés par d'autres que leur difficulté d'emploi faisait laisser de côté.

» Bien qu'il n'y ait rien de bien nouveau à dire sur le sujet, il semble utile de rappeler les méthodes les plus en faveur aujourd'hui et de fixer leurs limites d'emploi afin d'en généraliser l'usage.

» Il est nécessaire de rappeler, au début de cette Note, que, si les mesures magnétiques peuvent être faites avec une grande approximation, moyennant beaucoup de soin et de précautions, il ne faut pas exagérer la précision possible et utile dans les mesures industrielles qui sont les seules que nous visons ici.

» Le fer industriel est essentiellement un corps hétérogène, au point de vue magnétique plus encore qu'à tout autre, de sorte qu'il importe assez peu de déterminer très exactement les propriétés d'un échantillon, si un second échantillon, découpé à côté du premier, donne des différences notables. Or, l'expérience montre que des écarts de 20 pour 100 dans une même feuille de tôle ne sont pas rares.

» Ce qu'on doit demander aux méthodes industrielles, c'est une détermination moyenne satisfaisante et c'est là ce qui a conduit à essayer sur des masses de plus en plus grandes, prélevées en différents points du lot de métal étudié.

» Pour les mesures d'aimantation, comme pour celles des pertes en courant alternatif, la meilleure forme à donner à l'échantillon est celle d'un anneau de faible largeur radiale et de grand rayon moyen. Malheureusement cette forme rationnelle présente deux gros inconvénients qui font qu'elle n'est guère employée que pour les mesures précises ou en cas de contestation. Si l'on veut faire

l'essai sur quelques kilogrammes de métal, il faut découper un grand nombre de feuilles de tôle et perdre 8 à 10 fois plus de métal que l'échantillon lui-même n'en exige; de plus, il est nécessaire de faire l'enroulement magnétisant de chaque échantillon séparément, ce qui cause une grande perte de temps; finalement, cet essai est très coûteux, c'est pourquoi on a imaginé divers appareils dans lesquels les enroulements sont faits une fois pour toutes et qui peuvent recevoir des échantillons de dimensions relativement restreintes et de forme telle qu'il y a peu de métal perdu.

» Les deux mesures qui intéressent le plus l'électrotechnique sont la détermination de la courbe d'aimantation

$$B = f(H),$$

et la mesure de l'hystérésis et de la résistivité, ou celle des pertes totales en courant alternatif.

MESURE DES PERTES TOTALES.

» La méthode du wattmètre, qui est la première en date, reprend le premier rang et semble devoir éliminer complètement tous les hystérésimètres connus actuellement. Ceci est le résultat de l'évolution de l'industrie qui tend à faire travailler les matériaux au maximum de leur capacité et conduit à exiger de plus en plus des inductions supérieures à 15 000 gauss, là où, il y a quelques années encore, on ne dépassait guère 10 000.

» Les hystérésimètres ne permettant pas des mesures supérieures à 10 000, on est obligé d'extrapoler pour connaître les pertes au delà, et cette extrapolation n'est pas sans danger là où la loi empirique renferme un exposant qui peut varier, selon le fer étudié, de 1,6 à plus de 2 !

» Cette difficulté, jointe à d'autres petits inconvénients des hystérésimètres, a conduit les adversaires les plus acharnés de la méthode du wattmètre à l'adopter malgré ses défauts reconnus.

» La méthode du wattmètre a contre elle d'exiger un matériel coûteux et encombrant, dont la manipulation nécessite beaucoup de soin et les mesures sont longues et délicates.

» Comme avantages, il faut lui reconnaître les suivants : elle

donne directement l'ensemble des pertes qui intéressent les électriciens, hystérésis et courants de Foucault; enfin, l'essai peut et doit être fait sur un échantillon de plusieurs kilogrammes ce qui donne immédiatement une moyenne assez approchée.

» On sait en quoi consiste cette méthode : le fer à essayer est recouvert d'un enroulement magnétisant B, dans lequel on fait

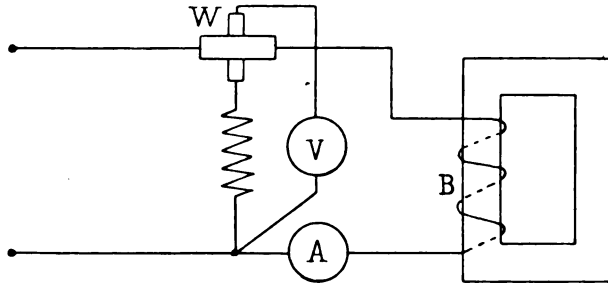


Fig. 1. — Schéma de la méthode du wattmètre.

passer un courant alternatif de fréquence connue. La puissance totale dépensée dans l'enroulement est mesurée à l'aide du wattmètre W, et un voltmètre V placé aux bornes indique la tension d'où l'on déduit la valeur de l'induction maximum correspondante. Il suffit de retrancher la puissance dépensée par effet Joule dans l'enroulement lui-même, et le reste représente la perte totale dans le fer, par hystérésis et courants de Foucault.

» Si la méthode est fort simple en principe, elle comporte, en pratique, de nombreuses variantes, tant sur la forme de l'échantillon que sur les moyens mis en œuvre; elle a été codifiée par l'*Association électrotechnique allemande* et est devenue officielle au *Laboratoire physico-technique de Charlottenbourg*; sous une forme un peu différente, elle est également officielle aux États-Unis et appliquée au *Bureau of Standards de Washington*.

» Les variantes sont évidemment susceptibles de donner des indications précieuses aux industriels qui les emploient exclusivement; mais l'embarras commence dès qu'on veut comparer les résultats obtenus de divers côtés, et c'est pour cela qu'il semble utile de rappeler les conditions à remplir et les appareils qui paraissent les mieux compris à ce point de vue.

» Quelles sont donc les conditions nécessaires pour obtenir des résultats exacts et comparables à l'aide du wattmètre?

Il faut que :

a. Le fer étudié soit soumis à une induction aussi uniforme que possible dans toute la masse ;

b. La puissance mesurée au wattmètre soit, autant que possible, limitée à la puissance dépensée dans le fer essayé ;

c. Le courant alternatif employé donne une variation de flux aussi voisine que possible de la sinusoïde.

d. La force électromotrice induite, qui sert à la mesure de l'induction β et fournit le courant dans le circuit volts du wattmètre, soit uniquement due à la variation du flux dans le fer ;

e. Enfin, la fréquence du courant doit être maintenue constante pendant toute la mesure.

» Comment peut-on remplir ces conditions et corriger les résultats des erreurs dues à leur non-observation ?

» a. *Uniformité du flux.* — La perte d'énergie dans du fer soumis à un champ alternatif dépend, toutes choses égales d'ailleurs, de l'aimantation maximum atteinte pendant le cycle : il est donc indispensable que l'induction soit la même dans tout l'échantillon essayé, mais on peut se demander néanmoins dans quelle mesure l'uniformité doit être atteinte pour que les valeurs trouvées soient pratiquement exactes.

» Si l'on se donne une masse de fer et une répartition inégale du flux, on peut, par le calcul, à l'aide des formules d'interpolation, ou en tenant compte de résultats d'expériences, déterminer la perte en chaque point de la masse et faire le total de façon à connaître la perte réelle dans toute la masse. Si, en même temps, on détermine exactement l'*induction moyenne* dans cette masse, on voit que la valeur totale mesurée correspond bien, pratiquement, à celle qu'on obtiendrait avec une induction uniforme égale à l'induction moyenne trouvée. Tant que les écarts entre la moyenne et les valeurs maximum et minimum ne s'écartent pas de plus de 10 pour 100, l'accord est obtenu avec une approximation égale aux erreurs de mesure.

» L'uniformité du flux, qu'on recherche avec tant de soin, sans d'ailleurs l'atteindre jamais, n'a donc pas d'autre but que de permettre la mesure exacte de la valeur moyenne de l'induction.

» *b.* Le wattmètre appliqué directement sur une bobine magnétisante mesure à la fois la puissance dépensée dans le fer et la puissance dépensée par effet Joule dans la bobine et une partie des appareils de mesures. Il est évident que la mesure est d'autant plus exacte que l'effet Joule est plus négligeable devant la puissance totale. C'est ce qui arrive aux inductions de l'ordre de 10 000 à 12 000, pour lesquelles le courant magnétisant est relativement faible, mais, quand on arrive à 15 000 et au-dessus, valeurs vers lesquelles on tend de plus en plus aujourd'hui, l'effet Joule dans la bobine peut devenir égal ou supérieur à la puissance dépensée dans le fer, et comme, pour déterminer l'effet Joule, il faut connaître exactement la résistance des circuits, ce qui est difficile à cause de l'échauffement inévitable, et l'intensité du courant, on conçoit bien que les résultats diminuent de précision à mesure que l'intensité augmente.

» Si l'on place le circuit volts du wattmètre sur un circuit

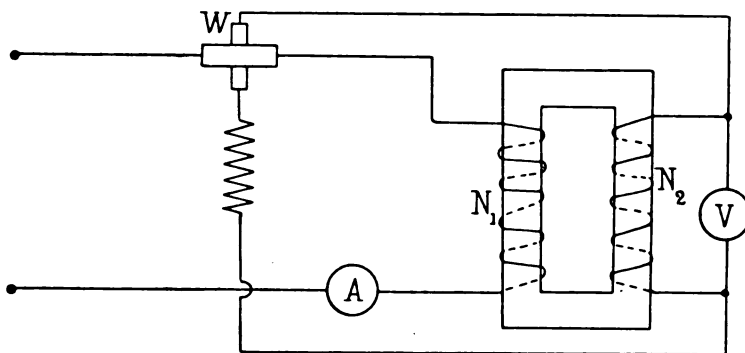


Fig. 2. — Schéma de la méthode du wattmètre avec circuit induit.

auxiliaire de N_2 spires, enroulé très près du fer, le circuit magnétisant ayant N_1 spires, on obtient sur le wattmètre W une lecture P proportionnelle à $e_2 I \cos \varphi$, e_2 étant la force électromotrice d'induction engendrée dans les N_2 spires secondaires. Dans les N_1 spires primaires, nous avons une force électromotrice e_1 , en phase avec e_2 , dont le produit par l'intensité I et par $\cos \varphi$ représente la puissance totale p dépensée dans le fer et la puissance $\frac{e_2^2}{r}$ dépensée dans le circuit N_2 ,

$$e_1 I \cos \varphi = p + \frac{e_2^2}{r},$$

en appelant r la résistance totale du circuit secondaire. Or, comme on a aussi

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2},$$

on obtient

$$p = \frac{N_1}{N_2} P - \frac{e_2^2}{r}.$$

» Avec les appareils de mesures dont on dispose actuellement, et même en mettant en parallèle le wattmètre et le voltmètre, on peut arriver à faire que le terme $\frac{e_2^2}{r}$ ne dépasse pas 10 pour 100 de la puissance cherchée, donc la correction n'est pas susceptible de causer d'erreurs importantes.

» Cette variante, proposée depuis longtemps déjà, se répand de plus en plus et les appareils pratiques dont nous allons parler peuvent être disposés pour son application.

» Une autre conséquence importante de la condition que nous examinons, c'est que le circuit magnétique ne doit renfermer que le fer essayé, à l'exclusion de toute masse conductrice, magnétique ou non, dans laquelle il pourrait se dépenser de l'énergie par hystérésis ou courants de Foucault.

» c. Les pertes par hystérésis, et, dans une certaine mesure, les pertes par courants de Foucault, dépendent de l'induction maximum et non de la *forme* du flux en fonction du temps, mais la mesure de cette valeur maximum ne peut se faire qu'à l'aide d'un voltmètre qui donne la valeur efficace aux bornes; il faut donc connaître cette *forme* de la courbe de tension pour en déduire le rapport entre la valeur efficace et le maximum, ou, plutôt, la grandeur qui entre directement dans le calcul, le *facteur de forme* α

$$\alpha = \frac{\text{tension efficace}}{\text{tension moyenne}};$$

on sait, en effet, que la valeur maximum Φ_0 du flux, supposé uniformément réparti dans les N spires, est donnée, en fonction de la tension efficace u et pour une fréquence n , par

$$\Phi_0 = \frac{10^8 u}{4 n N \alpha}.$$

» Le facteur de forme a donc une grande importance et sa

détermination doit être faite avec soin pour le courant employé et pour diverses intensités, car tel alternateur, qui donne à vide une courbe de tension sinusoïdale, en donne une autre très déformée en charge et il n'est pas rare de voir le facteur de forme passer de 1,11 à vide, ce qui correspond à la sinusoïde, à 1,20 et plus lorsque l'intensité augmente. La figure 3 montre deux courbes

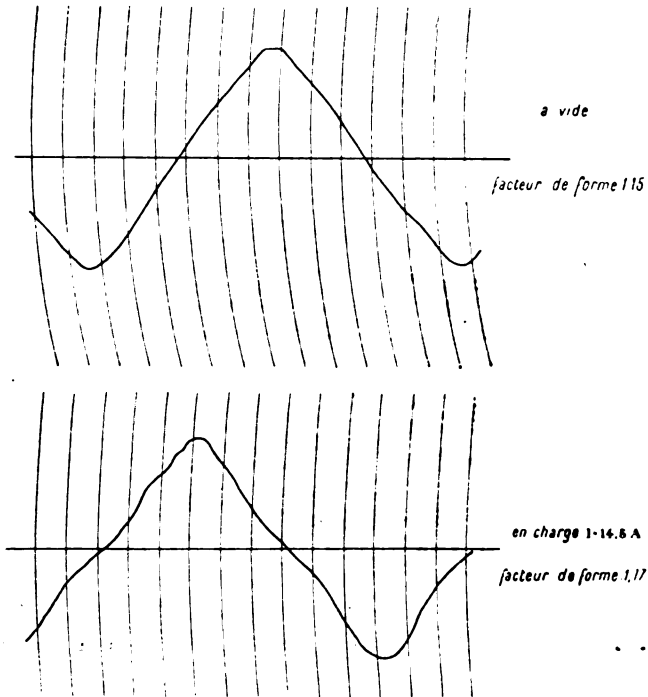


Fig. 3. — Courbes de tension.

relevées sur un alternateur et qu'on serait tenté de prendre pour des sinusoïdes, tandis que le facteur de forme est de 4 pour 100 plus élevé dans un cas et de 6 pour 100 dans l'autre. Le même alternateur, travaillant à une intensité environ double, donne un facteur de forme supérieur à 1,25; dans ces conditions, il vaut mieux ne pas tenir compte des résultats obtenus.

» C'est un fait bien connu que les courbes de tension des alternateurs sont plus fréquemment pointues et donnent un facteur de forme souvent supérieur à 1,11, de sorte que, si on les utilise sans tenir compte de la forme de la courbe, on trouve des valeurs trop élevées pour v_0 ; c'est pour ce motif que beaucoup de con-

structeurs croient faire travailler les tôles des transformateurs à des inductions bien supérieures à celles qui sont atteintes réellement.

» La détermination du facteur de forme peut se faire au moyen des courbes de tension relevées à l'oscillographe ou à l'ondographe; ce procédé est assez long, mais il peut donner de bons résultats.

» On peut aussi, comme au *Bureau of Standards*, mesurer directement la tension efficace au moyen d'un voltmètre bien calibré et la tension moyenne avec l'appareil de Rose et Kuhns qui se compose essentiellement d'un commutateur inverseur, destiné à envoyer successivement les demi-périodes du courant alternatif dans le même sens dans un voltmètre à courant continu qui mesure bien ainsi la *valeur moyenne*.

» Enfin, une solution approchée est donnée par un voltmètre spécial construit par la Société Westinghouse. Un électrodyna-

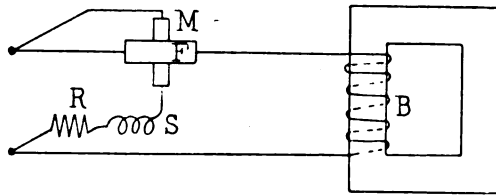


Fig. 4. — Voltmètre Westinghouse pour la mesure des pertes dans le fer.

momètre, monté en wattmètre, dont la bobine fixe F est en série avec une bobine à noyau de fer B, a sa bobine mobile M munie d'une résistance de réglage R et d'une bobine de self-induction sans fer S. Convenablement gradué, cet appareil indique une tension plus faible ou plus élevée que la tension efficace, selon que le facteur de forme est supérieur ou inférieur à 1,11, de sorte que, placé aux bornes d'un transformateur alimenté par une tension de forme quelconque, il indique la tension sinusoïdale qui donnerait les mêmes pertes dans le fer. Encore une fois, cette solution n'est qu'approchée.

» En résumé, ce qu'il faut bien retenir, c'est que la mesure du facteur de forme est *indispensable*, si l'on veut obtenir des résultats comparables.

» *d.* Qu'on mesure la tension aux bornes de la bobine magnétisante ou d'une bobine auxiliaire, la valeur mesurée est due au flux total qui traverse les spires de la bobine. Si l'enroulement est fait directement sur le fer, il n'y a aucune correction à appliquer, mais ce n'est généralement pas le cas : afin de faciliter les essais, ces bobines sont enroulées à l'avance sur une carcasse isolante, de sorte que la surface des spires peut être beaucoup plus grande que la section du fer (*fig. 5*).

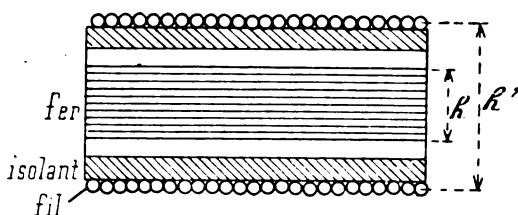


Fig. 5. — Coupe d'une bobine magnétisante.

» Aux faibles inductions, le champ magnétisant qui traverse l'espace entre le fer et les spires est très petit et le flux qui en résulte peut être négligé devant celui qui est dû au fer. Aux inductions élevées, qu'on cherche de plus en plus aujourd'hui, il n'en est pas de même et il faut tenir compte du flux additionnel, pour obtenir la valeur exacte de $\mathfrak{w}_0$. Nous avons vu, en effet, que le résultat est, pratiquement, indépendant de l'inégalité de distribution du flux dans le fer, si l'on mesure réellement l'*induction moyenne* pour tout le fer soumis à l'essai.

» La correction du flux additionnel pourrait être calculée d'après la surface moyenne des spires σ , la section du fer s , le nombre de spires N , la longueur du circuit magnétique l , si l'on connaissait l'intensité *maximum* I_m et la différence de phase entre I et $\mathfrak{w}$. A défaut de ces données, qu'on ne peut guère facilement déterminer, on peut, comme première approximation, prendre

$$\Phi_0 = \mathfrak{w}_0 s + \sqrt{2} \frac{4\pi N I}{l} (\sigma - s),$$

$$\mathfrak{w}_0 = \left[\frac{u \times 10^8}{4\pi N \alpha} - \sqrt{2} \frac{4\pi N I_{eff}}{l} (\alpha - s) \right] \frac{1}{s}.$$

» La même correction peut être faite, automatiquement et plus sûrement, en plaçant dans le circuit magnétisant le primaire

d'un transformateur sans fer T, dont le secondaire est connecté en opposition avec la bobine induite de l'appareil (fig. 6). Par

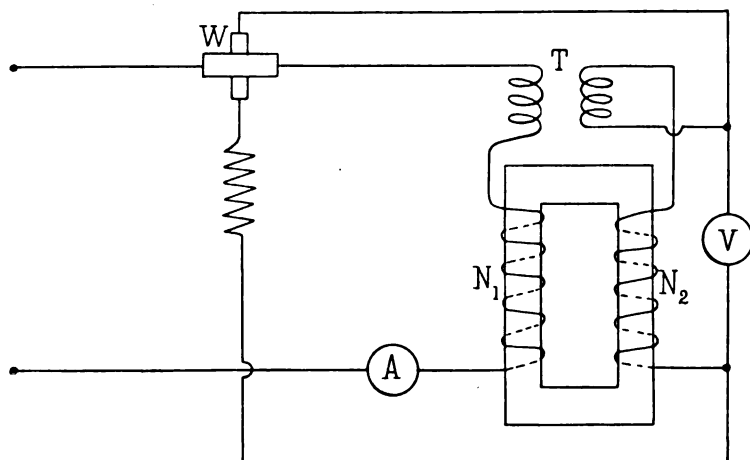


Fig. 6. — Schéma de la méthode du wattmètre avec circuit induit et bobine de compensation.

un réglage de construction on détermine l'induction mutuelle des deux circuits de telle façon que la force électromotrice engendrée dans la bobine T soit, à chaque instant, égale et opposée à celle qui est développée dans la bobine induite N₂ par le flux passant entre le fer et les spires.

» Pour obtenir l'induction moyenne dans tout le fer, il faut que les spires de l'enroulement sur lequel on mesure la tension soient également réparties tout le long du circuit magnétique; c'est pour cette raison que l'application de la méthode du wattmètre à des échantillons en forme de noyaux de transformateurs amène des erreurs. Malgré les précautions prises pour éviter les fuites magnétiques, le flux qui traverse les spires est toujours plus élevé que le flux moyen dans le fer, de sorte que l'induction mesurée est toujours plus élevée que la réalité et, chose non moins grave, la dispersion augmentant avec le flux, le terme de correction n'est pas constant. Les valeurs trouvées dans ces conditions montrent toujours des pertes plus faibles que la réalité et comme la dispersion varie d'un modèle à l'autre, les résultats sont loin d'être comparables.

» Enfin, lorsqu'on utilise un échantillon en forme d'anneau, le flux maximum est uniforme tout le long de l'anneau mais sa

répartition varie dans la section : l'induction est plus grande au centre où les lignes de force sont moins longues qu'à la périphérie. En donnant un grand diamètre à l'anneau et une faible épaisseur radiale, cette différence s'atténue beaucoup; mais, comme l'enroulement peut être parfaitement uniforme tout le long de l'anneau, on mesure bien l'*induction moyenne* et les résultats sont à peu près indépendants de la répartition suivant le rayon et, par suite, de l'épaisseur radiale.

» e. Il n'est pas facile de faire les mesures en maintenant constantes à la fois la tension et la fréquence. Si l'on veut connaître les pertes pour une induction et une fréquence données, il faut maintenir un des facteurs constant et faire varier l'autre. On peut, il est vrai ramener à une valeur déterminée et très voisine par un calcul de correction, mais celui-ci est plus facile à faire sur la tension que sur la fréquence et il est préférable de mesurer plusieurs points avec des tensions différentes et une fréquence constante. Pour cela, il suffit de surveiller la vitesse et de faire les lectures au moment où elle atteint la valeur convenable. Les fréquencemètres qu'on construit actuellement rendent cette manœuvre aisée.

INSTRUMENTS.

» Il n'y a pas à parler ici des instruments de mesures électriques qu'on trouve à peu près partout, ni des alternateurs puisque nous connaissons la qualité essentielle qu'ils doivent présenter : donner à toutes les charges une courbe de tension très voisine de la sinusoïde. Disons seulement que, pour bien remplir cette condition, il est nécessaire de choisir un alternateur puissant, car la déformation de la courbe est d'autant plus marquée qu'on travaille plus près de l'intensité maximum. Il ne faut pas oublier que les hautes inductions exigent souvent une puissance apparente 40 ou 50 fois plus grande que la puissance réelle.

» Enfin, pour garder le facteur de forme aussi constant que possible, il faut faire varier la tension en agissant sur le rhéostat d'excitation de l'alternateur, sans introduire de résistance dans le circuit magnétisant, ce qui déformerait sûrement la courbe de tension.

» Ce que je veux considérer surtout ici c'est la forme de l'échantillon et la disposition des bobines magnétisantes et induites.

» Un seul appareil utilise, à ma connaissance, la forme rationnelle de l'anneau et il faut reconnaître que cet appareil a été peu employé et paraît abandonné actuellement, c'est l'*appareil de Mollinger*. Dans cet instrument, les tôles sont découpées en

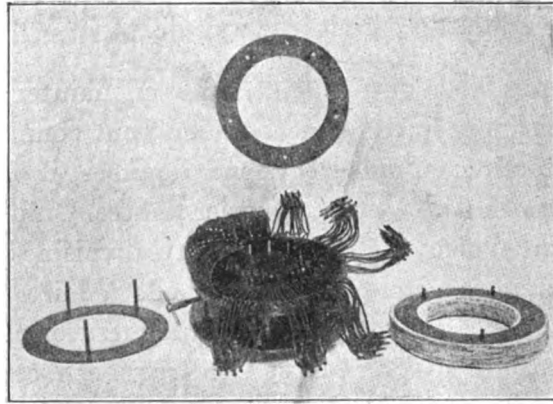


Fig. 7. — Appareil de Mollinger.

anneaux et empilées sur un support muni de plots métalliques reliés à des fils souples terminés par des fiches. Une fois l'empilage terminé, il suffit de placer les fiches dans les trous des plots inté-

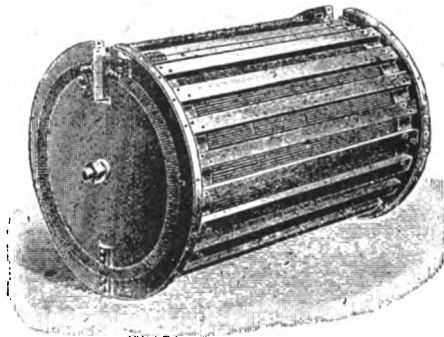


Fig. 8. — Appareil Richter.

rieurs pour réaliser très rapidement un enroulement continu autour du fer.

» La préoccupation de faire l'essai sur une feuille de tôle quelconque, sans la mettre hors d'usage, a conduit Richter à construire

un appareil intéressant dans lequel on peut introduire des feuilles entières et les retirer ensuite pour s'en servir. Dans cet instrument les tôles sont enroulées en cylindre de façon que leurs extrémités se rejoignent et se croisent pour faire joint. Un enroulement fait d'avance est placé sur une carcasse en bois qui sert de guide pour rouler les tôles en cylindre. Quand le nombre de feuilles convenable a été introduit dans l'appareil, le joint magnétique est bien établi en serrant entre elles les extrémités des tôles et il suffit d'envoyer le courant alternatif dans l'enroulement et de faire la mesure.

» Les résultats de l'appareil de Richter sont très corrects tant que la valeur du champ magnétisant est faible, c'est-à-dire tant qu'on ne dépasse pas l'induction 10000, mais pour les valeurs élevées la correction à apporter au flux est considérable, la surface des spires étant plus de 20 fois la section du fer.

» Nous arrivons enfin à l'appareil qui semble actuellement le

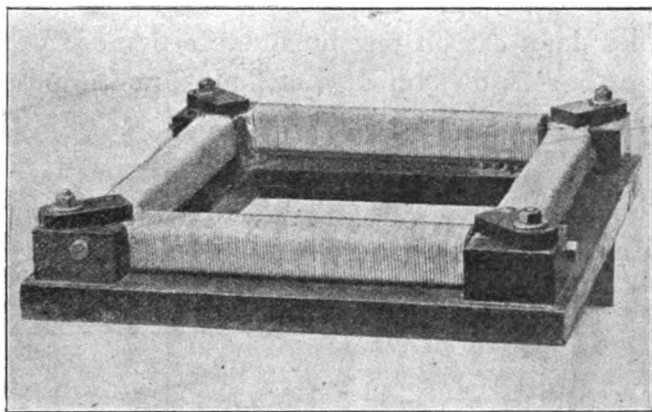


Fig. 9. -- Appareil d'Epstein.

plus commode et le plus exact, celui d'Epstein, en usage officiellement à Charlottenbourg et à Washington.

» Dans l'appareil d'Epstein le fer essayé est découpé en bandes rectangulaires avec lesquelles on forme quatre faisceaux semblables et ceux-ci sont introduits dans quatre bobines magnétisantes disposées sur les côtés d'un carré. Le circuit magnétique se trouve ainsi fermé et l'aimantation est à peu près uniformément répartie tout le long du faisceau.

» A l'usage, ces appareils peuvent différer par la longueur, les dimensions des faisceaux, la disposition des joints et des enroulements.

» *Faisceaux.* — Pour amener une aimantation uniforme, il faut que la longueur des lignes de force dans toutes la masse de fer soit aussi constante que possible et ceci conduit à employer des barreaux longs et étroits; il ne faut cependant pas exagérer la réduction de largeur, car on sait qu'il est impossible de couper des tôles sans modifier sensiblement l'état moléculaire des parties voisines de la coupure, de sorte que plus l'échantillon se rétrécit, plus grande devient l'importance relative de la zone troublée par le découpage.

» Au laboratoire de Charlottenbourg, les bandes doivent avoir 50×3 cm et le poids total de l'échantillon mesuré atteint 10 kg.

» A Washington les bandes ont $25,4 \times 5$ cm et le poids total est seulement de 2 kg.

» Dans les deux cas on recommande de prendre la moitié des bandes dans le sens du laminage et l'autre moitié perpendiculairement.

» *Joints.* — Dans l'appareil allemand, les quatre faisceaux sont placés bout à bout, les lames dans le plan du carré formé par les

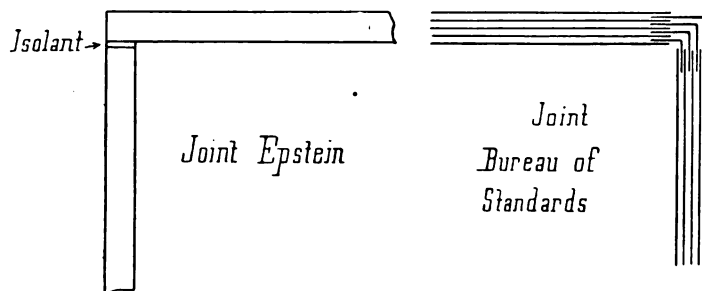


Fig. 10. — Disposition des joints.

bobines et, afin d'assurer l'uniformité du flux dans l'entrefer qui les sépare, on place une lame de carton isolant de 0,3 mm d'épaisseur entre les bouts. L'expérience semble montrer que cette précaution n'est pas indispensable et qu'elle augmente les fuites

magnétiques en rendant la répartition du flux le long du barreau plus irrégulière.

» Dans l'appareil de Washington les lames sont placées de champ, perpendiculairement au plan des bobines; elles sont séparées par des feuilles isolantes d'épaisseur égale à la leur et les joints sont faits à l'aide de petites pièces de fer découpées également dans l'échantillon essayé, et coudées, qu'on introduit entre les bouts des lames des paquets consécutifs; le tout est ensuite serré fortement pour assurer un bon joint.

» Il ne semble pas absolument nécessaire de prendre des précautions aussi grandes pour les joints si l'on veut seulement mesurer les pertes et si l'enroulement induit est placé assez uniformément sur le fer pour qu'on mesure bien réellement l'induction moyenne; ces précautions sont un peu superflues pour les mesures pratiques et le simple joint obtenu par contact direct entre les bouts des faisceaux est bien suffisant.

» *Enroulements.* — Quoi qu'on fasse, il se produit toujours une petite dispersion aux joints, de sorte que le flux n'est pas aussi grand dans le fer près des joints qu'au milieu des barreaux. Pour pallier à ce défaut, Epstein a proposé récemment de diviser

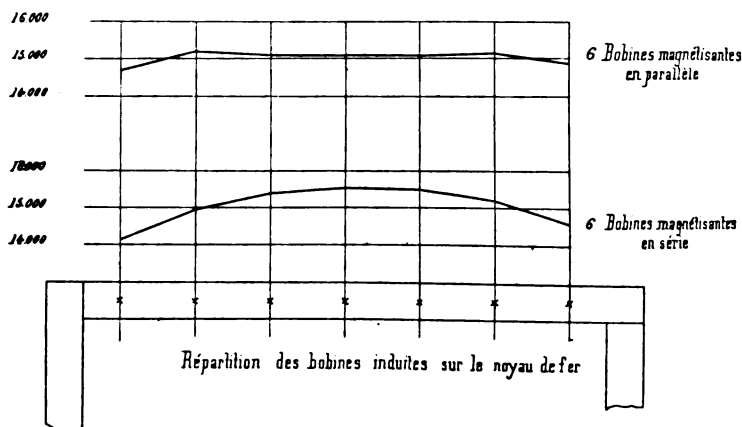


Fig. 11. — Répartition du flux le long des barreaux.

l'enroulement magnétisant en sections ayant toutes le même nombre de spires et placées côte à côte tout le long des barreaux. Ces sections, mises en parallèle sur la tension totale, doivent fournir

Il faut que :

a. Le fer étudié soit soumis à une induction aussi uniforme que possible dans toute la masse ;

b. La puissance mesurée au wattmètre soit, autant que possible, limitée à la puissance dépensée dans le fer essayé ;

c. Le courant alternatif employé donne une variation de flux aussi voisine que possible de la sinusoïde.

d. La force électromotrice induite, qui sert à la mesure de l'induction β et fournit le courant dans le circuit volts du wattmètre, soit uniquement due à la variation du flux dans le fer ;

e. Enfin, la fréquence du courant doit être maintenue constante pendant toute la mesure.

» Comment peut-on remplir ces conditions et corriger les résultats des erreurs dues à leur non-observation ?

» a. *Uniformité du flux.* — La perte d'énergie dans du fer soumis à un champ alternatif dépend, toutes choses égales d'ailleurs, de l'aimantation maximum atteinte pendant le cycle : il est donc indispensable que l'induction soit la même dans tout l'échantillon essayé, mais on peut se demander néanmoins dans quelle mesure l'uniformité doit être atteinte pour que les valeurs trouvées soient pratiquement exactes.

» Si l'on se donne une masse de fer et une répartition inégale du flux, on peut, par le calcul, à l'aide des formules d'interpolation, ou en tenant compte de résultats d'expériences, déterminer la perte en chaque point de la masse et faire le total de façon à connaître la perte réelle dans toute la masse. Si, en même temps, on détermine exactement l'*induction moyenne* dans cette masse, on voit que la valeur totale mesurée correspond bien, pratiquement, à celle qu'on obtiendrait avec une induction uniforme égale à l'induction moyenne trouvée. Tant que les écarts entre la moyenne et les valeurs maximum et minimum ne s'écartent pas de plus de 10 pour 100, l'accord est obtenu avec une approximation égale aux erreurs de mesure.

» L'uniformité du flux, qu'on recherche avec tant de soin, sans d'ailleurs l'atteindre jamais, n'a donc pas d'autre but que de permettre la mesure exacte de la valeur moyenne de l'induction.

» *b.* Le wattmètre appliqué directement sur une bobine magnétisante mesure à la fois la puissance dépensée dans le fer et la puissance dépensée par effet Joule dans la bobine et une partie des appareils de mesures. Il est évident que la mesure est d'autant plus exacte que l'effet Joule est plus négligeable devant la puissance totale. C'est ce qui arrive aux inductions de l'ordre de 10 000 à 12 000, pour lesquelles le courant magnétisant est relativement faible, mais, quand on arrive à 15 000 et au-dessus, valeurs vers lesquelles on tend de plus en plus aujourd'hui, l'effet Joule dans la bobine peut devenir égal ou supérieur à la puissance dépensée dans le fer, et comme, pour déterminer l'effet Joule, il faut connaître exactement la résistance des circuits, ce qui est difficile à cause de l'échauffement inévitable, et l'intensité du courant, on conçoit bien que les résultats diminuent de précision à mesure que l'intensité augmente.

» Si l'on place le circuit volts du wattmètre sur un circuit

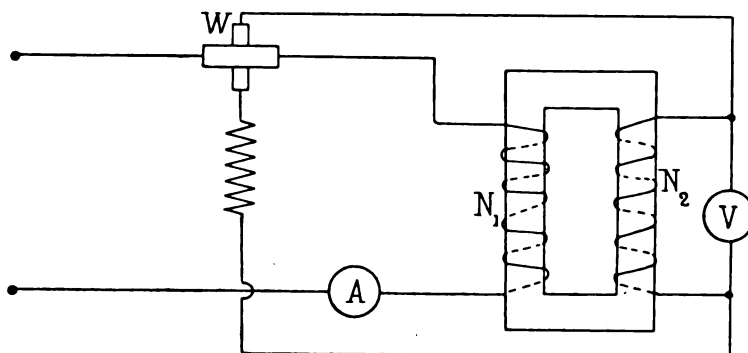


Fig. 2. — Schéma de la méthode du wattmètre avec circuit induit.

auxiliaire de N_2 spires, enroulé très près du fer, le circuit magnétisant ayant N_1 spires, on obtient sur le wattmètre W une lecture P proportionnelle à $e_2 I \cos \varphi$, e_2 étant la force électromotrice d'induction engendrée dans les N_2 spires secondaires. Dans les N_1 spires primaires, nous avons une force électromotrice e_1 , en phase avec e_2 , dont le produit par l'intensité I et par $\cos \varphi$ représente la puissance totale p dépensée dans le fer et la puissance $\frac{e_2^2}{r}$ dépensée dans le circuit N_2 ,

$$e_1 I \cos \varphi = p + \frac{e_2^2}{r},$$

en appelant r la résistance totale du circuit secondaire. Or, comme on a aussi

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2},$$

on obtient

$$p = \frac{N_1}{N_2} P - \frac{e_2^2}{r}.$$

» Avec les appareils de mesures dont on dispose actuellement, et même en mettant en parallèle le wattmètre et le voltmètre, on peut arriver à faire que le terme $\frac{e_2^2}{r}$ ne dépasse pas 10 pour 100 de la puissance cherchée, donc la correction n'est pas susceptible de causer d'erreurs importantes.

» Cette variante, proposée depuis longtemps déjà, se répand de plus en plus et les appareils pratiques dont nous allons parler peuvent être disposés pour son application.

» Une autre conséquence importante de la condition que nous examinons, c'est que le circuit magnétique ne doit renfermer que le fer essayé, à l'exclusion de toute masse conductrice, magnétique ou non, dans laquelle il pourrait se dépenser de l'énergie par hystérésis ou courants de Foucault.

» c. Les pertes par hystérésis, et, dans une certaine mesure, les pertes par courants de Foucault, dépendent de l'induction maximum et non de la *forme* du flux en fonction du temps, mais la mesure de cette valeur maximum ne peut se faire qu'à l'aide d'un voltmètre qui donne la valeur efficace aux bornes; il faut donc connaître cette *forme* de la courbe de tension pour en déduire le rapport entre la valeur efficace et le maximum, ou, plutôt, la grandeur qui entre directement dans le calcul, le *facteur de forme* α

$$\alpha = \frac{\text{tension efficace}}{\text{tension moyenne}};$$

on sait, en effet, que la valeur maximum Φ_0 du flux, supposé uniformément réparti dans les N spires, est donnée, en fonction de la tension efficace u et pour une fréquence n , par

$$\Phi_0 = \frac{10^8 u}{4 n N \alpha}.$$

» Le facteur de forme a donc une grande importance et sa

détermination doit être faite avec soin pour le courant employé et pour diverses intensités, car tel alternateur, qui donne à vide une courbe de tension sinusoïdale, en donne une autre très déformée en charge et il n'est pas rare de voir le facteur de forme passer de 1,11 à vide, ce qui correspond à la sinusoïde, à 1,20 et plus lorsque l'intensité augmente. La figure 3 montre deux courbes

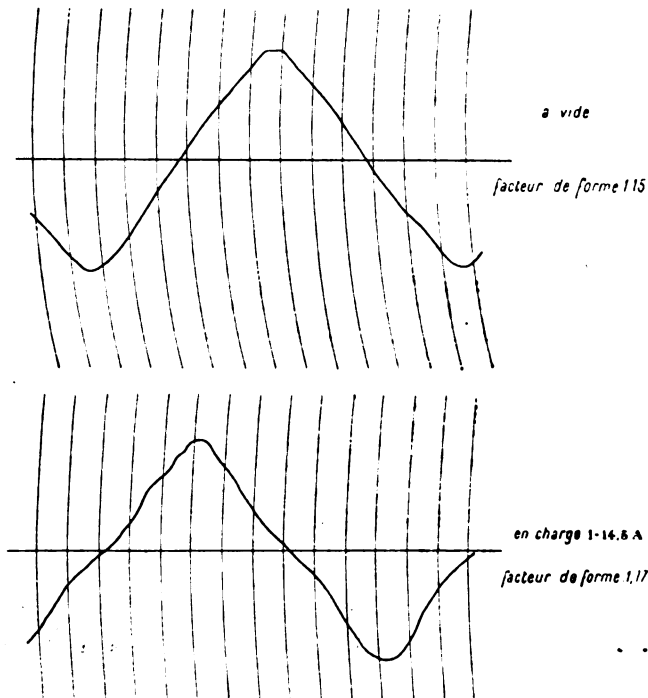


Fig. 3. — Courbes de tension.

relevées sur un alternateur et qu'on serait tenté de prendre pour des sinusoïdes, tandis que le facteur de forme est de 4 pour 100 plus élevé dans un cas et de 6 pour 100 dans l'autre. Le même alternateur, travaillant à une intensité environ double, donne un facteur de forme supérieur à 1,25; dans ces conditions, il vaut mieux ne pas tenir compte des résultats obtenus.

» C'est un fait bien connu que les courbes de tension des alternateurs sont plus fréquemment pointues et donnent un facteur de forme souvent supérieur à 1,11, de sorte que, si on les utilise sans tenir compte de la forme de la courbe, on trouve des valeurs trop élevées pour v_{b_0} ; c'est pour ce motif que beaucoup de con-

structeurs croient faire travailler les tôles des transformateurs à des inductions bien supérieures à celles qui sont atteintes réellement.

» La détermination du facteur de forme peut se faire au moyen des courbes de tension relevées à l'oscillographe ou à l'ondographe; ce procédé est assez long, mais il peut donner de bons résultats.

» On peut aussi, comme au *Bureau of Standards*, mesurer directement la tension efficace au moyen d'un voltmètre bien calibré et la tension moyenne avec l'appareil de Rose et Kuhns qui se compose essentiellement d'un commutateur inverseur, destiné à envoyer successivement les demi-périodes du courant alternatif dans le même sens dans un voltmètre à courant continu qui mesure bien ainsi la *valeur moyenne*.

» Enfin, une solution approchée est donnée par un voltmètre spécial construit par la Société Westinghouse. Un électrodyna-

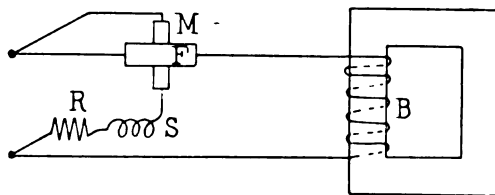


Fig. 4. — Voltmètre Westinghouse pour la mesure des pertes dans le fer.

momètre, monté en wattmètre, dont la bobine fixe F est en série avec une bobine à noyau de fer B, a sa bobine mobile M munie d'une résistance de réglage R et d'une bobine de self-induction sans fer S. Convenablement gradué, cet appareil indique une tension plus faible ou plus élevée que la tension efficace, selon que le facteur de forme est supérieur ou inférieur à 1,11, de sorte que, placé aux bornes d'un transformateur alimenté par une tension de forme quelconque, il indique la tension sinusoïdale qui donnerait les mêmes pertes dans le fer. Encore une fois, cette solution n'est qu'approchée.

» En résumé, ce qu'il faut bien retenir, c'est que la mesure du facteur de forme est *indispensable*, si l'on veut obtenir des résultats comparables.

» d. Qu'on mesure la tension aux bornes de la bobine magnétisante ou d'une bobine auxiliaire, la valeur mesurée est due au flux total qui traverse les spires de la bobine. Si l'enroulement est fait directement sur le fer, il n'y a aucune correction à appliquer, mais ce n'est généralement pas le cas : afin de faciliter les essais, ces bobines sont enroulées à l'avance sur une carcasse isolante, de sorte que la surface des spires peut être beaucoup plus grande que la section du fer (fig. 5).

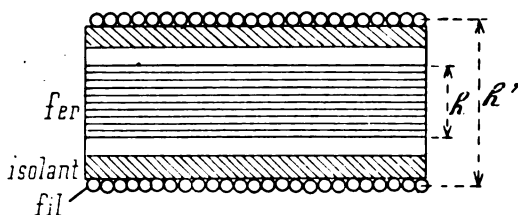


Fig. 5. — Coupe d'une bobine magnétisante.

» Aux faibles inductions, le champ magnétisant qui traverse l'espace entre le fer et les spires est très petit et le flux qui en résulte peut être négligé devant celui qui est dû au fer. Aux inductions élevées, qu'on cherche de plus en plus aujourd'hui, il n'en est pas de même et il faut tenir compte du flux additionnel, pour obtenir la valeur exacte de $\mathfrak{W}_0$. Nous avons vu, en effet, que le résultat est, pratiquement, indépendant de l'inégalité de distribution du flux dans le fer, si l'on mesure réellement l'induction moyenne pour tout le fer soumis à l'essai.

» La correction du flux additionnel pourrait être calculée d'après la surface moyenne des spires σ , la section du fer s , le nombre de spires N , la longueur du circuit magnétique l , si l'on connaissait l'intensité maximum I_m et la différence de phase entre I et $\mathfrak{W}$. À défaut de ces données, qu'on ne peut guère facilement déterminer, on peut, comme première approximation, prendre

$$\Phi_0 = \mathfrak{W}_0 s + \sqrt{2} \frac{4\pi N I}{l} (\sigma - s),$$

$$\mathfrak{W}_0 = \left[\frac{u \times 10^8}{4\pi N \alpha} - \sqrt{2} \frac{4\pi N I_{eff}}{l} (\alpha - s) \right] \frac{l}{s}.$$

» La même correction peut être faite, automatiquement et plus sûrement, en plaçant dans le circuit magnétisant le primaire

d'un transformateur sans fer T, dont le secondaire est connecté en opposition avec la bobine induite de l'appareil (fig. 6). Par

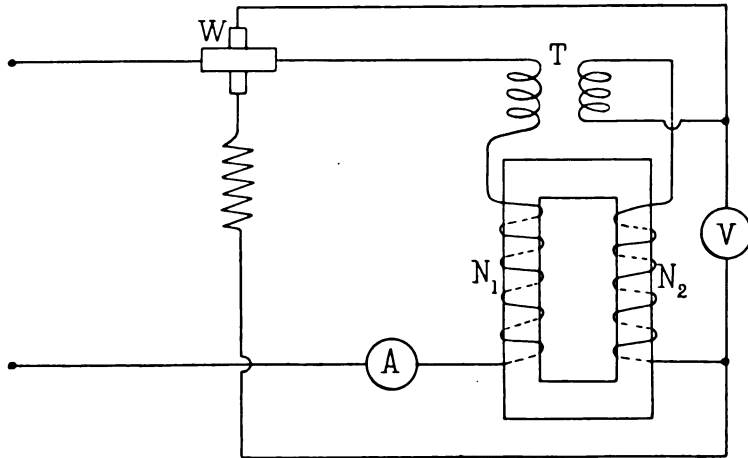


Fig. 6. — Schéma de la méthode du wattmètre avec circuit induit et bobine de compensation.

un réglage de construction on détermine l'induction mutuelle des deux circuits de telle façon que la force électromotrice engendrée dans la bobine T soit, à chaque instant, égale et opposée à celle qui est développée dans la bobine induite N_2 par le flux passant entre le fer et les spires.

» Pour obtenir l'induction moyenne dans tout le fer, il faut que les spires de l'enroulement sur lequel on mesure la tension soient également réparties tout le long du circuit magnétique; c'est pour cette raison que l'application de la méthode du wattmètre à des échantillons en forme de noyaux de transformateurs amène des erreurs. Malgré les précautions prises pour éviter les fuites magnétiques, le flux qui traverse les spires est toujours plus élevé que le flux moyen dans le fer, de sorte que l'induction mesurée est toujours plus élevée que la réalité et, chose non moins grave, la dispersion augmentant avec le flux, le terme de correction n'est pas constant. Les valeurs trouvées dans ces conditions montrent toujours des pertes plus faibles que la réalité et comme la dispersion varie d'un modèle à l'autre, les résultats sont loin d'être comparables.

» Enfin, lorsqu'on utilise un échantillon en forme d'anneau, le flux maximum est uniforme tout le long de l'anneau mais sa

répartition varie dans la section : l'induction est plus grande au centre où les lignes de force sont moins longues qu'à la périphérie. En donnant un grand diamètre à l'anneau et une faible épaisseur radiale, cette différence s'atténue beaucoup; mais, comme l'enroulement peut être parfaitement uniforme tout le long de l'anneau, on mesure bien l'*induction moyenne* et les résultats sont à peu près indépendants de la répartition suivant le rayon et, par suite, de l'épaisseur radiale.

» e. Il n'est pas facile de faire les mesures en maintenant constantes à la fois la tension et la fréquence. Si l'on veut connaître les pertes pour une induction et une fréquence données, il faut maintenir un des facteurs constant et faire varier l'autre. On peut, il est vrai ramener à une valeur déterminée et très voisine par un calcul de correction, mais celui-ci est plus facile à faire sur la tension que sur la fréquence et il est préférable de mesurer plusieurs points avec des tensions différentes et une fréquence constante. Pour cela, il suffit de surveiller la vitesse et de faire les lectures au moment où elle atteint la valeur convenable. Les fréquencesmètres qu'on construit actuellement rendent cette manœuvre aisée.

INSTRUMENTS.

» Il n'y a pas à parler ici des instruments de mesures électriques qu'on trouve à peu près partout, ni des alternateurs puisque nous connaissons la qualité essentielle qu'ils doivent présenter : donner à toutes les charges une courbe de tension très voisine de la sinusoïde. Disons seulement que, pour bien remplir cette condition, il est nécessaire de choisir un alternateur puissant, car la déformation de la courbe est d'autant plus marquée qu'on travaille plus près de l'intensité maximum. Il ne faut pas oublier que les hautes inductions exigent souvent une puissance apparente 40 ou 50 fois plus grande que la puissance réelle.

» Enfin, pour garder le facteur de forme aussi constant que possible, il faut faire varier la tension en agissant sur le rhéostat d'excitation de l'alternateur, sans introduire de résistance dans le circuit magnétisant, ce qui déformerait sûrement la courbe de tension.

» Ce que je veux considérer surtout ici c'est la forme de l'échantillon et la disposition des bobines magnétisantes et induites.

» Un seul appareil utilise, à ma connaissance, la forme rationnelle de l'anneau et il faut reconnaître que cet appareil a été peu employé et paraît abandonné actuellement, c'est l'*appareil de Mollinger*. Dans cet instrument, les tôles sont découpées en

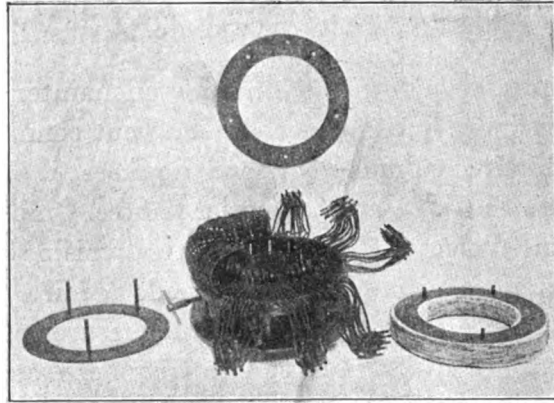


Fig. 7. — Appareil de Mollinger.

anneaux et empilées sur un support muni de plots métalliques reliés à des fils souples terminés par des fiches. Une fois l'empilage terminé, il suffit de placer les fiches dans les trous des plots inté-

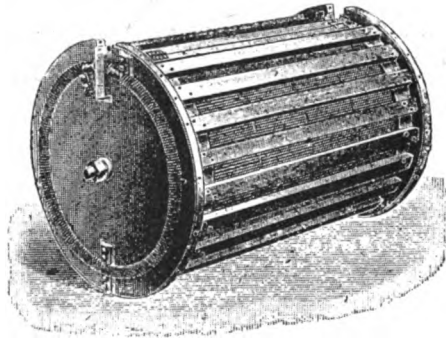


Fig. 8. — Appareil Richter.

rieurs pour réaliser très rapidement un enroulement continu autour du fer.

» La préoccupation de faire l'essai sur une feuille de tôle quelconque, sans la mettre hors d'usage, a conduit Richter à construire

un appareil intéressant dans lequel on peut introduire des feuilles entières et les retirer ensuite pour s'en servir. Dans cet instrument les tôles sont enroulées en cylindre de façon que leurs extrémités se rejoignent et se croisent pour faire joint. Un enroulement fait d'avance est placé sur une carcasse en bois qui sert de guide pour rouler les tôles en cylindre. Quand le nombre de feuilles convenable a été introduit dans l'appareil, le joint magnétique est bien établi en serrant entre elles les extrémités des tôles et il suffit d'envoyer le courant alternatif dans l'enroulement et de faire la mesure.

» Les résultats de l'appareil de Richter sont très corrects tant que la valeur du champ magnétisant est faible, c'est-à-dire tant qu'on ne dépasse pas l'induction 10000, mais pour les valeurs élevées la correction à apporter au flux est considérable, la surface des spires étant plus de 20 fois la section du fer.

» Nous arrivons enfin à l'appareil qui semble actuellement le

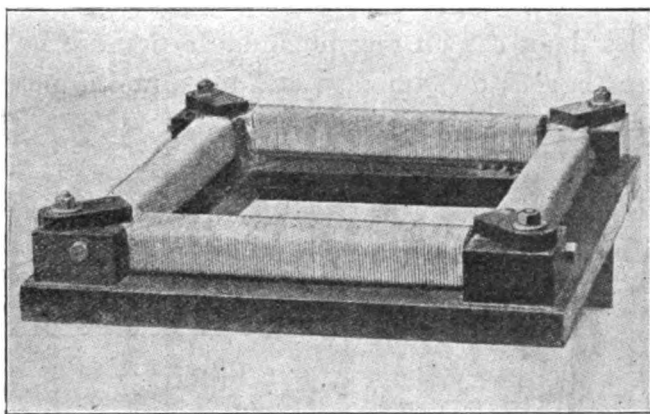


Fig. 9. -- Appareil d'Epstein.

plus commode et le plus exact, celui d'Epstein, en usage officiellement à Charlottenbourg et à Washington.

» Dans l'appareil d'Epstein le fer essayé est découpé en bandes rectangulaires avec lesquelles on forme quatre faisceaux semblables et ceux-ci sont introduits dans quatre bobines magnétisantes disposées sur les côtés d'un carré. Le circuit magnétique se trouve ainsi fermé et l'aimantation est à peu près uniformément répartie tout le long du faisceau.

» A l'usage, ces appareils peuvent différer par la longueur, les dimensions des faisceaux, la disposition des joints et des enroulements.

» *Faisceaux.* — Pour amener une aimantation uniforme, il faut que la longueur des lignes de force dans toute la masse de fer soit aussi constante que possible et ceci conduit à employer des barreaux longs et étroits; il ne faut cependant pas exagérer la réduction de largeur, car on sait qu'il est impossible de couper des tôles sans modifier sensiblement l'état moléculaire des parties voisines de la coupure, de sorte que plus l'échantillon se rétrécit, plus grande devient l'importance relative de la zone troublée par le découpage.

» Au laboratoire de Charlottenbourg, les bandes doivent avoir 50×3 cm et le poids total de l'échantillon mesuré atteint 10 kg.

» A Washington les bandes ont $25,4 \times 5$ cm et le poids total est seulement de 2 kg.

» Dans les deux cas on recommande de prendre la moitié des bandes dans le sens du laminage et l'autre moitié perpendiculairement.

» *Joints.* — Dans l'appareil allemand, les quatre faisceaux sont placés bout à bout, les lames dans le plan du carré formé par les

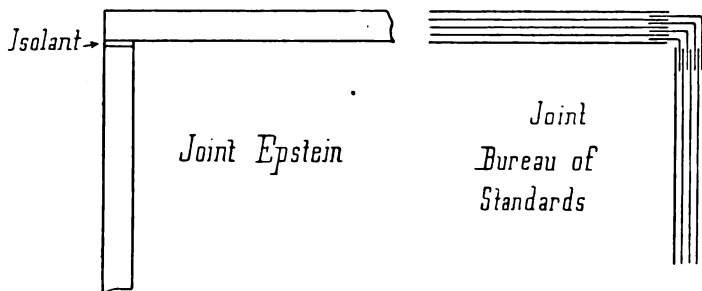


Fig. 10. — Disposition des joints.

bobines et, afin d'assurer l'uniformité du flux dans l'entrefer qui les sépare, on place une lame de carton isolant de 0,3 mm d'épaisseur entre les bouts. L'expérience semble montrer que cette précaution n'est pas indispensable et qu'elle augmente les fuites

magnétiques en rendant la répartition du flux le long du barreau plus irrégulière.

» Dans l'appareil de Washington les lames sont placées de champ, perpendiculairement au plan des bobines; elles sont séparées par des feuilles isolantes d'épaisseur égale à la leur et les joints sont faits à l'aide de petites pièces de fer découpées également dans l'échantillon essayé, et coudées, qu'on introduit entre les bouts des lames des paquets consécutifs; le tout est ensuite serré fortement pour assurer un bon joint.

» Il ne semble pas absolument nécessaire de prendre des précautions aussi grandes pour les joints si l'on veut seulement mesurer les pertes et si l'enroulement induit est placé assez uniformément sur le fer pour qu'on mesure bien réellement l'induction moyenne; ces précautions sont un peu superflues pour les mesures pratiques et le simple joint obtenu par contact direct entre les bouts des faisceaux est bien suffisant.

» *Enroulements.* — Quoi qu'on fasse, il se produit toujours une petite dispersion aux joints, de sorte que le flux n'est pas aussi grand dans le fer près des joints qu'au milieu des barreaux. Pour pallier à ce défaut, Epstein a proposé récemment de diviser

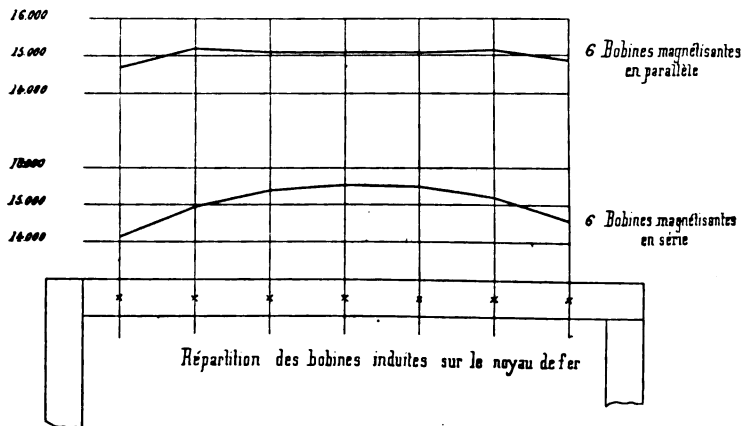


Fig. 11. — Répartition du flux le long des barreaux.

l'enroulement magnétisant en sections ayant toutes le même nombre de spires et placées côte à côte tout le long des barreaux. Ces sections, mises en parallèle sur la tension totale, doivent fournir

des forces électromotrices égales, elles doivent donc être traversées par des flux égaux. La figure 11 montre ce qu'on peut gagner par ce moyen. Toujours d'après ce qui précède, cette complication ne paraît pas nécessaire ; mais il est vrai qu'en l'indiquant Epstein avait en vue l'emploi de son appareil pour la mesure de la courbe d'aimantation plutôt que celle des pertes. Comme le fait remarquer Gümlich, cette solution n'est pas efficace pour la courbe d'aimantation et complique inutilement l'appareil.

» Entre ces trois appareils, mes préférences vont nettement à celui d'Epstein avec des barreaux longs et suffisamment étroits ; avec un enroulement induit placé uniformément sur toute la longueur du fer et présentant une surface de spires aussi petite que possible ; enfin, muni d'une bobine de compensation pour corriger, aux inductions élevées, le flux additionnel dans l'intervalle entre les spires et le fer.

FORMULES D'INTERPOLATION.

» Nous ne connaissons aucune relation théorique entre les pertes et l'induction et nous devons déterminer ces pertes aux différents points soit par l'expérience directe, soit par interpolation graphique quand nous connaissons plusieurs points de la courbe, soit, ce qui est plus grave, par extrapolation en partant de coefficients expérimentaux et de formules empiriques. Tout ce que nous savons, c'est que, pour un fer donné, la perte par hystérésis augmente avec l'induction maximum et avec la fréquence, tandis que la perte due aux courants de Foucault croît comme le carré de la fréquence et, probablement, de l'induction maximum.

» Pour l'hystérésis, les expériences déjà anciennes de Steinmetz avaient montré que la loi empirique

$$W_h = \eta V n^{1,6}$$

satisfaisait pratiquement dans les limites usitées alors et avec les qualités de fer dont on disposait.

» Depuis, les inductions se sont élevées et les qualités ont beaucoup changé, de sorte que la loi de Steinmetz se montre de plus en plus insuffisante pour représenter les phénomènes ; il faut

ajouter d'ailleurs, pour être juste, que nous ne connaissons actuellement aucune formule capable de donner une solution convenable dans toute l'étendue de l'échelle.

» Pour illustrer ceci, nous allons prendre les mesures de quatre échantillons différents. Les trois premiers A, B et C sont des aciers : l'un ordinaire, les autres à 2,5 pour 100 et 3,5 pour 100 de silicium. Les mesures ont été faites par l'auteur, en collaboration avec M. Jouaust, il y a deux ans environ, par la méthode du wattmètre et sur des anneaux du poids total de 10 kg. Deux séries de mesures ont été faites, les unes par la méthode directe en prenant la différence de potentiel aux bornes du circuit magnétisant, les autres à l'aide d'un circuit secondaire enroulé directement sur le fer. Les courbes de la figure 14 montrent que la concordance des deux méthodes est satisfaisante. Il faut ajouter que nous avons éliminé les points pour lesquels le facteur de forme de la tension était supérieur à 1,21, afin de ne pas introduire de valeurs trop incertaines.

» Le quatrième échantillon SSW a été mesuré au laboratoire de Siemens Schuckert et les nombres ont été cités par Richter à propos d'une formule d'interpolation dont nous parlons plus loin.

» En construisant avec ces nombres le diagramme classique

$$\log W := f(\log 10^5),$$

on devrait voir tous les points tomber sur une droite d'inclinaison égale à l'exposant de la formule de Steinmetz, si cette formule était exacte pour toute l'étendue de l'échelle : or, il est facile de voir sur la figure 12, que si la tôle ordinaire A s'écarte peu de la loi, les autres courbes sont nettement concaves vers le haut, dès qu'on dépasse 10 000.

» Si nous considérons seulement les inductions inférieures à 10 000, la loi peut être représentée par une droite qui est prolongée par un pointillé sur la figure 12 et nous trouvons alors, pour cette partie des courbes, les exposants suivants :

Qualité ordinaire.....	A	1,73
Alliage à 2,5 pour 100 Si	B	1,77
Alliage à 3,5 pour 100 Si	C	1,81
Échantillon.....	SSW	1,62

» Si l'on tient à conserver la loi de Steinmetz, mais avec un

autre exposant et pour toute l'étendue de l'échelle, il faut faire passer une droite qui laisse les points également au-dessus et au-dessous de la courbe; on se trouve alors conduit à des exposants voisins de 2 et à une approximation de l'ordre de 10 pour 100

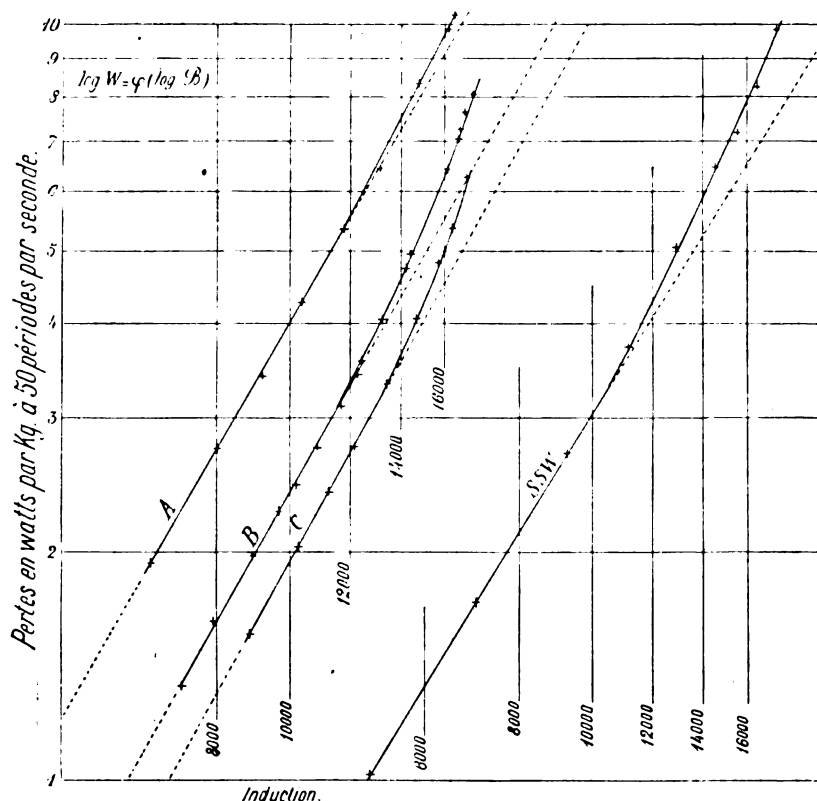


Fig. 12. — Diagramme logarithmique des pertes dans le fer.

environ; il ne faut pas oublier que le coefficient de Steinmetz varie beaucoup avec l'exposant choisi. En résumé, pour les inductions élevées, il semble difficile de conserver la loi de Steinmetz.

» Pour représenter avec plus d'exactitude, et par une formule plus facile à calculer, les pertes en fonction des inductions, Richter a récemment proposé l'expression

$$W_s = \alpha v_b + b v_b^2,$$

qui, si elle était exacte, devrait donner une droite dans le diagramme

$$y = \frac{W}{u_0} = a + b u_0,$$

$$x = 1\frac{1}{2}.$$

» Il est facile de voir sur la figure 13 que cette formule, appliquée aux échantillons précédents, est en défaut dès qu'on dépasse 13 000,

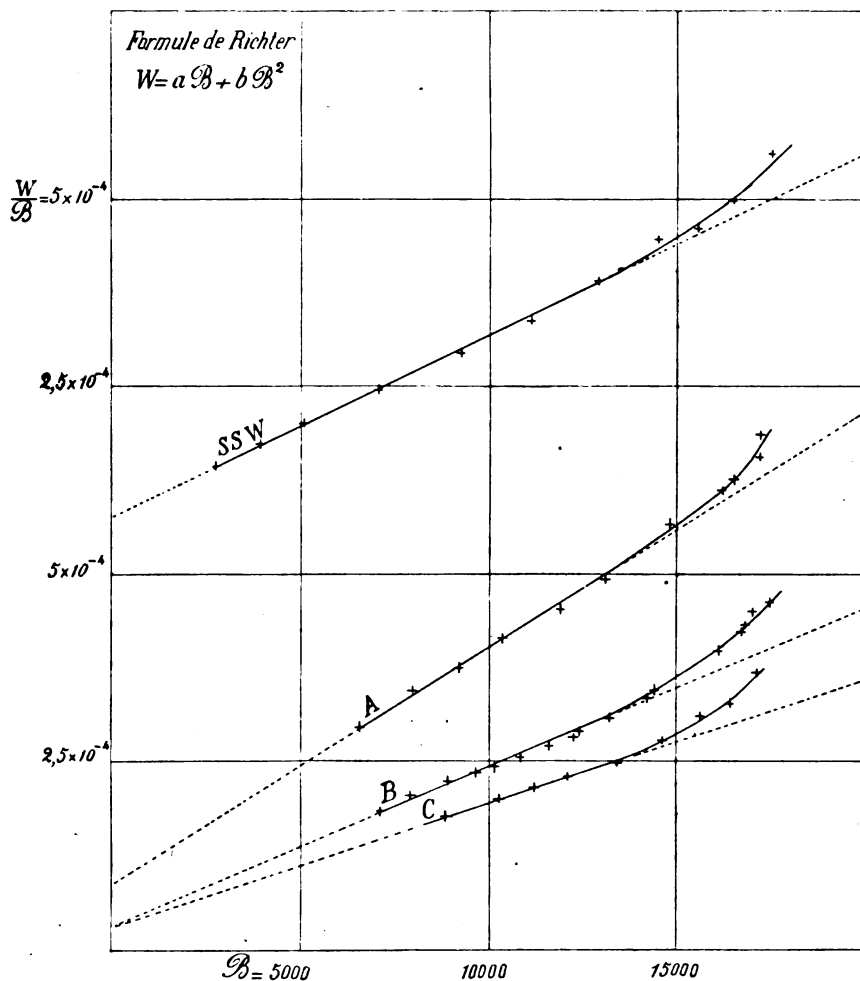


Fig. 13. — Diagramme de la formule de Richter.

mais il faut reconnaître qu'elle fournit malgré cela des valeurs un peu plus approchées que celle de Steinmetz.

» Il y a lieu de remarquer que, pour ces figures, nous avons pris pour A, B et C les pertes totales et non l'hystérésis seule, tandis que pour SSW c'est cette dernière qui est en jeu. On peut tracer les mêmes diagrammes pour A, B et C en déduisant les pertes par courants de Foucault et l'on reconnaît que les courbes obtenues sont identiquement semblables, ce qui se comprend, les fonctions

représentées étant assez voisines, dans la région considérée, pour ne pas apporter de trouble bien grave devant l'imprécision des mesures.

» Les essais effectués sur A, B et C m'avaient conduit, ainsi que beaucoup de mesures réalisées pour l'étude d'un hystérésimètre, à penser qu'au delà de 10000 les résultats seraient mieux représentés par une exponentielle de la forme

$$\log W = \log A + m \mathfrak{w},$$

ou, en logarithmes vulgaires,

$$W = A 10^{m \mathfrak{w}}.$$

» L'essai de cette formule sur un très grand nombre de données publiées par différents expérimentateurs m'a montré l'exactitude pratique de la formule pour les hautes inductions; malheureusement, elle est nettement en défaut au-dessous de 10000, là où la formule de Steinmetz est au contraire exacte, pourvu qu'on détermine l'exposant dans chaque cas.

» La figure 14, donne la traduction des résultats des quatre échantillons sous la forme

$$\begin{aligned} y &= \log W, \\ x &= \mathfrak{w}, \end{aligned}$$

et l'on voit que les points se groupent bien sur une droite d'inclinaison m . De cette figure on peut tirer :

Échantillon	A.....	$A = 1,05$	$m = 6 \times 10^{-5}$
»	B.....	0,47	7,12
»	C.....	0,398	6,96
»	SSW.....	0,63	6,83

» On pourrait donc définir la qualité d'un fer aux hautes inductions en indiquant la perte à 10000 et le coefficient m de l'exposant et l'on aurait, à l'induction $\mathfrak{w}$,

$$W_{\mathfrak{w}} = W_{10} \times 10^{m(\mathfrak{w}-10000)}.$$

» Pour les tôles à grande résistivité et de faible épaisseur, où les courants de Foucault sont relativement faibles, le coefficient m est assez voisin de 7, mais il n'en est pas de même pour les tôles ordinaires, même en limitant la formule à l'hystérésis et, par

conséquent, la définition d'un fer par ce moyen exigerait encore deux nombres. Dans ces conditions, il semble préférable de donner

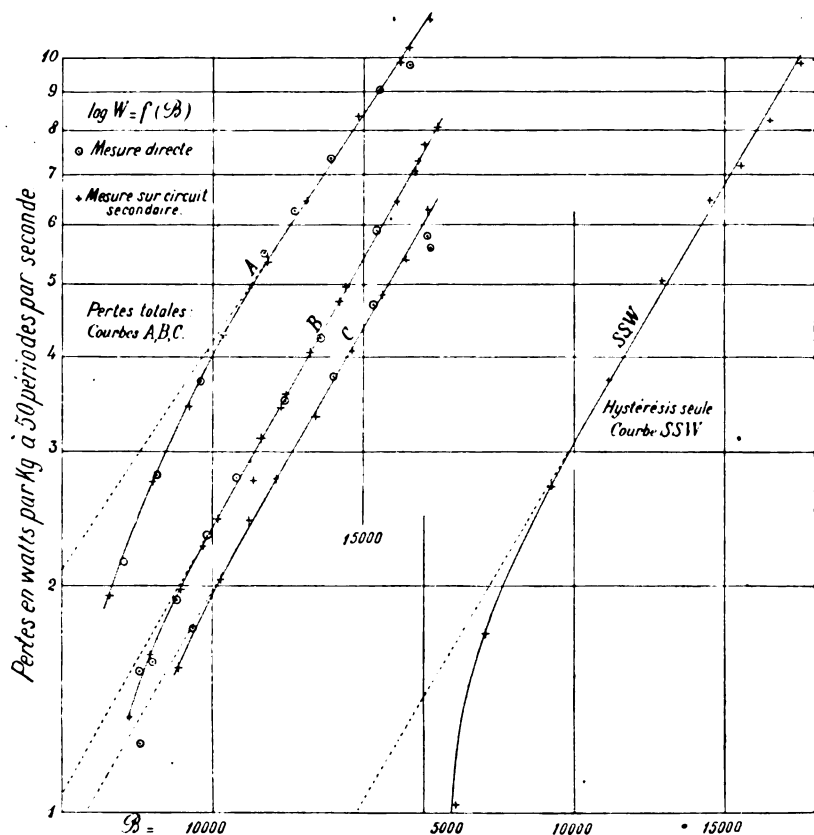


Fig. 14. — Diagramme de la formule exponentielle.

immédiatement les pertes pour deux inductions différentes, 10000 et 15000 par exemple, et à fréquence constante telle que 50; c'est ce qui se fait à l'étranger et la solution ne paraît pas trop mauvaise : elle a d'ailleurs cet avantage de ne pas exiger la connaissance d'une formule empirique qui peut s'oublier facilement.

» A ces valeurs, on devrait ajouter la résistivité qui permet de calculer, en cas de besoin, les valeurs pour d'autres fréquences et donne une indication utile pour tenir compte des contacts entre tôles inévitables dans la construction.

COURBE D'AIMANTATION.

» Aux inductions auxquelles travaille actuellement le fer, la connaissance exacte de la branche inférieure de la courbe d'aiman-

tation a moins d'importance qu'autrefois et la mesure est beaucoup plus simple, car il est bien plus facile de connaître la valeur de $\mathcal{H}$ qui donne une induction $\mathfrak{B}$. Au-dessus de 15000, tous les perméamètres bien étalonnés donnent des résultats équivalents et l'on cherche même à aller plus loin et à mesurer la courbe d'aimantation avec l'appareil servant à la mesure des pertes.

» Nous avons vu que les essais d'Epstein avaient pour but d'obtenir une aimantation plus uniforme le long du circuit magnétique, de façon à pouvoir mesurer l'induction correspondant au champ moyen. Au laboratoire de Charlottenbourg, des essais sont faits pour mesurer au balistique l'induction au milieu des barreaux de l'appareil d'Epstein ordinaire, c'est-à-dire à bobinage non divisé, tandis que le champ serait mesuré par une bobine placée au même point mais de telle sorte qu'elle ne reçoive que le flux extérieur au fer et très voisin de lui, c'est-à-dire le flux uniquement dû au champ magnétisant. Des mesures de ce genre exigent des appareils très sensibles pour la mesure de $\mathcal{H}$ et il faut attendre la réalisation pour savoir ce que la pratique peut en tirer.

» L'inconvénient des perméamètres, c'est qu'ils exigent des échantillons différents de ceux qui servent à la mesure des pertes; il en résulte une indécision dont l'importance pratique n'est d'ailleurs pas bien grande.

» Des expériences ont été faites dans ces dernières années sur l'aimantation dans les champs intenses, entre autres par Gümlich en Allemagne, Hadfield et Hopkinson en Angleterre; on peut en conclure, au point de vue pratique, que le fer est saturé à 2 ou 3 pour 100 près, dès que le champ magnétisant atteint 500 gauss; il paraît donc inutile, pour les mesures industrielles, d'aller au delà, puisque, $\mathfrak{B}$ pouvant être considéré comme constant, l'induction $\mathfrak{B}$ augmente simplement de la même quantité que le champ

$$\mathfrak{B} = \mathcal{H} + 4\pi\mathfrak{I}.$$

» Le maximum de l'intensité d'aimantation $\mathfrak{I}$ varie beaucoup avec la nature du fer; voisin de 1400 pour la fonte, il passe à plus de 1700 pour les fers très purs et se trouve entre 1500 et 1600 pour les aciers employés en électrotechnique, selon leur teneur en silicium. »

M. le PRÉSIDENT remercie M. Armagnat des intéressantes considérations qu'il a bien voulu développer à propos des mesures électriques industrielles.

M. JOUAUST. — « Je voudrais ajouter quelques mots à la très intéressante Communication de M. Armagnat, mon but étant de faire connaître comment, au Laboratoire central d'Électricité, nous envisageons la solution de ce problème très délicat qu'est la mesure des pertes totales dans le fer travaillant à une induction donnée.

» Le seul mode opératoire admissible dans tous les établissements où, comme au Laboratoire central, on ne doit avoir d'autre but que de donner aux mesures toute la précision désirable, consiste, comme le disait fort bien M. Armagnat tout à l'heure, dans l'emploi d'éprouvettes en forme d'anneaux à section rectangulaire. On faisait, il y a quelques années, à ce genre d'éprouvettes la critique suivante. Pour obtenir une aimantation uniforme il était nécessaire de donner aux anneaux une faible épaisseur axiale. Or d'autre part on sait que le découpage des tôles altère leurs propriétés magnétiques au voisinage de la région travaillée, de telle sorte que plus est faible la largeur des bandes qu'on découpe, plus est importante l'influence de la partie altérée et plus sont grandes les pertes hystérétiques. Campbell a montré ⁽¹⁾ que des bandes de 2,5 cm de large avaient des pertes par hystérésis de 10 pour 100 plus élevées que la tôle dans laquelle on les avait découpées. Mais ces phénomènes se font surtout sentir aux faibles inductions et deviennent presque négligeables lorsqu'on opère comme on le fait aujourd'hui, suivant les dernières instructions des électriciens allemands, à l'induction 15000.

» La critique que nous signalions plus haut a donc beaucoup moins d'importance à l'heure actuelle.

» Quant aux appareils genre Epstein, je crois qu'on peut dire qu'ils n'ont pas donné ce qu'on attendait d'eux. Ainsi Morton Lloyd prétendait, avec l'appareil que M. Armagnat vous a décrit tout à l'heure, faire des mesures à moins de 1 pour 100.

(1) *Journal of Institution of Electrical Engineers*, 1909, p. 553.

» Or Lancelot Wild ⁽¹⁾, inventeur également d'un perfectionnement de l'appareil d'Epstein, prétend que le dispositif américain donne dans le cas de tôles au silicium des résultats de 6 pour 100 trop élevés.

» D'autre part des échanges de tôles entre le National Physical Laboratory et la Physikalisch-technische Reichsanstalt ont montré entre les résultats obtenus dans ces deux établissements des écarts de 4 à 5 pour 100.

» D'autre part, il est certain qu'une usine métallurgique ou un atelier de construction ne peuvent évidemment, pour contrôler leurs tôles, consentir aux dépenses nécessaires pour la réalisation d'une éprouvette en forme d'anneau.

» Je crois que, pour les établissements de ce genre, la solution du problème sera la suivante : Les mesures seront faites avec des appareils genre Epstein pour lesquels les usines posséderaient des éprouvettes étalons préparées spécialement pour elles dans les laboratoires de mesures. Il faudrait probablement deux variétés d'éprouvettes : une d'acier ordinaire, une d'acier au silicium auxquelles on comparerait les variétés de même espèce. Dans ces conditions les mesures faites en usine devenant des mesures relatives seraient en grande partie affranchies des principales difficultés que vous signalait M. Armagnat tout à l'heure (forme de l'onde du courant alternatif, etc.).

» Certaines études sont du reste nécessaires pour la construction de ces éprouvettes et résident en grande partie dans la détermination de la manière dont doivent être découpées ces éprouvettes.

» On sait que la perméabilité d'une tôle n'est pas la même dans le sens du laminage ou dans le sens perpendiculaire. Pour ce même champ magnétisant, l'induction de 15000 dans le premier cas peut n'être que de 14000 dans le second. Il ne faudrait pas en conclure néanmoins que, pour comparer les résultats obtenus avec un anneau à ceux fournis par un appareil genre Epstein, il faut opérer comme le faisait ce dernier, deux des paquets étant composés de tôles découpées dans le sens du laminage, deux de tôles décou-

(1) *Journal of Institution of Electrical Engineers*, 1911, p. 217.

pées dans le sens perpendiculaire. Des expériences récentes faites à la Bismarkhütte et à la Reichsanstalt (1) ont montré que des tôles découpées à 45 degrés de la direction du laminage pouvaient avoir une perméabilité supérieure à celle de la direction du laminage. On voit que la réalisation d'éprouvettes pour l'industrie est une question qui demande encore certaines études et certaines précautions. »

M. le PRÉSIDENT remercie M. Jouaust.

(1) *Zeitschrift für Instrumentenkunde*, mai 1911, p. 163.

**NOUVEL OSCILLATEUR A ÉTINCELLES SOUFFLÉES ET ÉLECTRODES TOURNANTES
DE MM. F. DUCRETET ET E. ROGER.**

M. E. ROGER. — « Tous ceux qui s'intéressent aux applications de jour en jour plus nombreuses des courants de haute fréquence (télégraphie sans fil, électrothérapie, etc.) connaissent le rôle très important joué dans l'installation par l'appareil qu'on appelle *oscillateur* ou *éclateur d'étincelle*. Cette étincelle doit en effet posséder certaines qualités spéciales ayant une influence considérable sur le rendement et ayant pour effet d'assurer des oscillations énergiques et régulières. On peut dire d'une façon générale que la tension explosive et la résistance de l'étincelle doivent rester invariables quand l'intervalle explosif et les conditions électriques du circuit restent les mêmes.

» Les deux électrodes de l'éclateur, se trouvant reliées sans résistance ohmique aux bornes du circuit secondaire du transformateur, peuvent devenir le siège d'un arc électrique sous forme d'étincelle chaude. C'est ce qui se produit, par exemple, lorsqu'on rapproche trop les électrodes l'une de l'autre, lorsque la fréquence des étincelles devient trop grande, ou encore quand les conditions de la résonance dans le circuit primaire ne sont pas réalisées. Le milieu devient conducteur et laisse passage au courant secondaire du transformateur, ce qui produit un fort échauffement et un gaspillage inutile d'énergie.

» Divers procédés ont été employés dès le début pour remédier à ces inconvénients. En faisant jaillir l'étincelle dans un liquide isolant (oscillateur de Righi), on obtenait bien un meilleur refroidissement, tout en augmentant la tension explosive de l'étincelle; mais sous l'influence de l'étincelle, l'huile se trouvait décomposée et des particules charbonneuses restant en suspension dans le liquide diminuaient son pouvoir isolant et la formation de bulles gazeuses modifiaient sans cesse la résistance de l'étincelle. Ce procédé assez vite abandonné, on revint à l'éclateur dans l'air entre deux boules métalliques dont la distance était réglée par tâtonnement,

pour avoir le maximum de radiation dans l'antenne. Ce procédé a fourni de bons résultats dans le cas de faibles énergies en employant le montage à système direct ou indirect, avec bobine de Ruhmkorff. L'amortissement des oscillations, qui était très rapide, permettait une faible dépense d'énergie avec un bon rendement, car, à cette époque, le détecteur employé était encore le tube à limaille, sensible surtout à l'amplitude des oscillations. Mais lorsqu'on fut obligé, pour les postes importants, d'utiliser les courants fournis par les alternateurs produisant de plus grandes fréquences d'étincelle, il devint nécessaire d'employer des moyens de refroidissement énergiques de l'étincelle. M. d'Arsonval, dans ses expériences de courants de haute fréquence et d'électrothérapie, a dirigé un courant d'air comprimé entre les électrodes afin de souffler l'étincelle qui se subdivise ainsi en un grand nombre d'étincelles sinueuses; le même résultat peut aussi être obtenu en disposant l'éclateur dans un puissant champ magnétique (soufflage magnétique); enfin d'autres dispositifs sont encore employés sous le nom d'*éclateurs tournants*; la ventilation de l'étincelle est alors produite en déplaçant circulairement dans l'espace les deux électrodes de l'éclateur. Pour empêcher aussi l'échauffement des surfaces métalliques et leur désagrégation trop rapide lorsqu'une grande quantité d'énergie est mise en jeu, les électrodes reçoivent dans ce cas un mouvement de rotation qui renouvelle les surfaces en regard.

» Le nouvel éclateur à étincelles soufflées et électrodes tournantes que nous présentons aujourd'hui a été combiné dans le but de donner à l'étincelle les qualités nécessaires pour assurer le meilleur rendement de l'installation, surtout dans le cas des étincelle courtes et fréquentes.

» Les nouvelles méthodes d'émission qu'on emploie actuellement en radiotélégraphie et qui tendent à se généraliser ont pour but de produire une émission musicale. On sait que ce genre d'émission permet une meilleure perception des signaux par l'oreille malgré les bruits des décharges parasites si fréquentes en certains pays et répond mieux à la sensibilité des membranes téléphoniques. L'expérience a prouvé que la distance à laquelle peuvent être perçus correctement les signaux a pu être notablement augmentée pour une même puissance dépensée au transmetteur, leur son mu-

sical caractéristique tranchant nettement sur les autres bruits et ne pouvant se confondre avec eux.

» Mais pour obtenir ces résultats, il faut faire usage d'étincelles courtes et fréquentes et d'alternateurs à fréquence élevée (500 à 1000 périodes). C'est précisément dans ces cas que notre nouvel éclateur présente des avantages, en assurant un refroidissement énergique de l'étincelle et en évitant toute formation d'arc par étincelle chaude.

» L'appareil (*fig. 1*) se compose d'une électrode sphérique S,

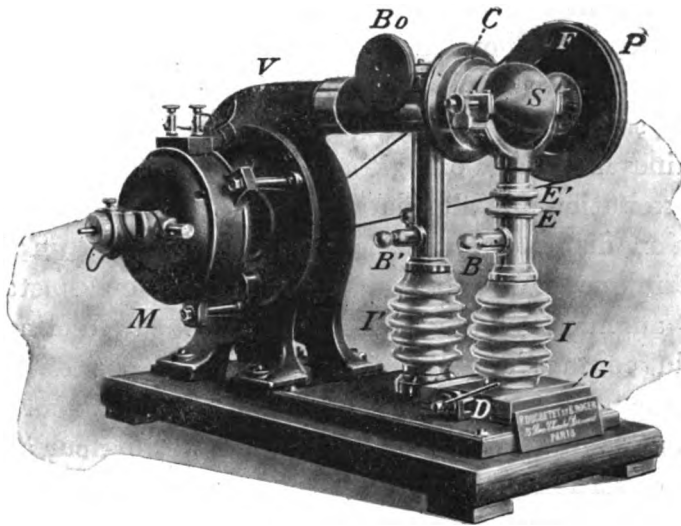


Fig. 1.

disposée en regard et dans l'axe d'une autre électrode de forme cylindrique C. Ces deux électrodes sont solidement montées sur des supports isolants en porcelaine I, I', et mis en communication avec le circuit oscillant au moyen de bornes B, B'. Un des supports I peut être déplacé latéralement au moyen d'une glissière G manœuvrée par une broche D et en hauteur au moyen de l'écrou E surmonté du contre-écrou E' pour obtenir un parfait centrage. La longueur de l'étincelle peut aussi être réglée pendant la marche, sans danger, au moyen du bouton à crémaillère B. Un ventilateur V, mû par un moteur électrique M, produit un violent courant d'air s'échappant par l'espace annulaire entre les électrodes S et C, où jaillit l'étincelle. L'électrode sphérique S reçoit un mouvement de rotation emprunté au moteur M au moyen d'une

courroie et d'une poulie P montée sur son axe. L'électrode cylindrique C est également mise en rotation autour de son axe par un embrayage à friction sur la poulie P munie d'une contre-plaque élastique F. Les deux électrodes tournent ainsi en regard l'une de l'autre suivant deux axes perpendiculaires : la décharge se fait entre des surfaces continuellement renouvelées et refroidies et se subdivise en une série d'étincelles multiples éclatant sur tout le pourtour de l'électrode C.

» Les surfaces actives restant froides, aucun arc ne peut se produire, et, dans le cas d'emploi de grandes fréquences d'étincelle, on obtient une note musicale très pure et facilement perceptible aux plus grandes distances sur les postes récepteurs de télégraphie sans fil. Cette note musicale peut d'ailleurs varier dans certaines limites si l'on agit soit sur la longueur de l'étincelle, soit sur l'excitation de l'alternateur.

» Lorqu'on dispose, suivant le procédé ordinaire, un ampèremètre thermique dans le circuit de l'antenne, on constate que, lorsqu'on augmente graduellement la longueur d'étincelle en partant du contact des électrodes, les déviations de l'aiguille du thermique vont en augmentant; l'étincelle rend d'abord un son musical aigu, le courant étant fourni par un alternateur à 500 $\sim$; bientôt la déviation de l'ampèremètre atteint un maximum, puis retombe brusquement à une valeur inférieure de 50 pour 100 environ; au même instant la note musicale descend d'une octave. Le nombre d'étincelles a subitement diminué de moitié. En continuant à allonger l'étincelle, la déviation augmente à nouveau jusqu'à atteindre un deuxième maximum, puis retombe à zéro, l'étincelle cesse de jaillir, la tension explosive n'étant plus suffisante pour franchir l'intervalle entre les deux électrodes.

» Grâce à l'obligeance de l'Administration des Postes et Télégraphes et en particulier de M. Petit, Ingénieur du Service de la Télégraphie sans fil, nous avons pu nous rendre compte des effets produits à la réception par l'émission musicale produite par ce nouvel éclateur. Nous avons pu réaliser quelques essais concluants entre la station d'expérience installée dans notre laboratoire de la rue Claude-Bernard et le poste de Melun (moulin de Cherisy). Malgré la faible hauteur de notre antenne, qui ne dépasse guère

le toit de la maison, et malgré son emplacement peu avantageux au milieu des maisons d'une grande ville, les émissions ont été cependant nettement entendues au poste de réception qui ne comportait qu'une antenne à un seul fil, alors que l'énergie mise en jeu avait été réduite à 150 watts. Le caractère nettement musical des signaux permettait une réception relativement facile même à la plus faible intensité.

» Nous nous permettons, en terminant, d'attirer l'attention sur le nouveau dispositif de condensateur que nous utilisons dans la constitution du circuit oscillatoire.

» Ces condensateurs sont formés de plaques métalliques, présentant, en certains points de leur surface et sur leurs deux faces, de petits gaufrages qui empêchent leur contact intime avec les plaques de verre qui les séparent. Le liquide isolant dans lequel est immergé le condensateur peut ainsi circuler librement entre les électrodes et empêche les échauffements locaux, qui sont souvent la cause de la détérioration des plaques de verre. Les condensateurs ainsi construits présentent une très grande endurance pour les tensions les plus élevées et nous les employons avec succès pour toutes les applications des courants de haute fréquence. »

M. le PRÉSIDENT remercie M. Roger d'avoir présenté cet appareil qui marque un nouveau progrès dans la télégraphie sans fil.

La séance est levée à 10 h du soir.

ÉCOLE SUPÉRIEURE D'ÉLECTRICITÉ.

PROMOTION XVII. — 1910-1911.

Liste des Élèves ayant obtenu le diplôme d'Ingénieur électricien.

MM. le capitaine du Génie LEFRANÇOIS, — d'Artillerie LOUIS, le lieutenant d'Artillerie CAUNEILLE,		Officiers délégués par le Ministère de la Guerre.
MM. VIARD, REYNAUD, PUGET,	MM. PICAULT, AGUILLON, SCHAEFFER.	Élèves-Ingénieurs de l'École professionnelle supér. des Postes et Télégraphes.
MM.	MM.	MM.
1. NIMIER.	29. CHAPUIS.	57. CAPELLE.
2. JOEN.	30. BAYLE.	58. MALATERRE.
3. LAVABRE.	31. GAUCHER.	59. POLIAKOFF.
4. DOMENACH.	32. ANDRÉ.	60. CADART.
5. LAPINÉ.	33. FLANQUET.	61. PELLISSIER.
6. DÉNIARÉ.	34. SADOWSKY.	62. HUBERT.
7. POULAIN.	35. PERRET.	63. MOUNÉ.
8. CHAPPÉE.	36. ERHARDT.	64. JUNG.
9. MASSEY.	37. LAURENT.	65. DE BANCAREL.
10. GAYDAN.	38. COSTABEL.	66. ROSENWALD.
11. BASCUÑANA.	39. TRUBLEREAU.	67. DIOT.
12. BOCQUET.	40. FOURNIER.	68. OSOLIN.
13. REYMOND.	41. LILAMAND.	69. STIELTJES.
14. DESFORGES.	42. DE LEISSÈGUES.	70. CRASNER.
15. JOLIVET.	43. FAUCONNEAU.	71. LESTIC.
16. COULLAUT.	44. PORION.	72. COLANÉRI.
17. MASNOU.	45. HAUMONTÉ.	73. VINCENT (Albert).
18. LAGARRIGUE.	46. TAULÉRA.	74. DENOIX.
19. VINCENT (Marcel).	47. TUJAGUE.	75. VALENSI.
20. BAUD.	48. BUREAU.	76. FRANÇOIS.
21. BUISSON.	49. MARTINEAU.	77. PERNIER.
22. BARON.	50. MIRVILLE.	78. GUINOCHET.
23. ARFEUX.	51. VACK.	79. BAUMAN.
24. CAPON.	52. DUPUIS.	80. ESTEBAN Y CASTAÑO.
25. ISTEL.	53. BOILEVIN.	81. CLAVEL.
26. DÉPIERRIS.	54. ITHIER.	82. CAMINATI.
27. RIBOUD.	55. BONNÉCUELLE.	
28. JANCOLESCO.	56. PAYET.	

Anciens Élèves :

BOUDINEAU,
CHAUDRON.

Vétérans :

ESCARRAS,
MILHAUD,
MACHELARD.

BIBLIOGRAPHIE.

Le ferro-magnétisme. Applications industrielles. par R. JOUAUST, chef de travaux au Laboratoire central d'Électricité. 1 volume in-18 jésus, cartonné toile, de 420 pages avec 55 figures dans le texte. *Encyclopédie scientifique*, O. Doin et fils, éditeurs, 8, place de l'Odéon, Paris.

Le volume de M. Jouaust vient à point, après les progrès récents de l'industrie métallurgique dans la préparation des matériaux magnétiques, pour rassembler les documents publiés de toutes parts sur une question si intéressante et qui touche de si près au calcul des machines dynamo-électriques.

Les titres des Chapitres sont les suivants :

- I. Phénomènes généraux. Théorie du circuit magnétique.
- II. Les phénomènes magnétiques dans le fer. L'hystérésis.
- III. Influence de la composition et du mode de préparation des substances ferro-magnétiques sur leurs propriétés.
- IV. Des aimants permanents.

Un index bibliographique très développé complète cette intéressante et consciencieuse publication.

La technique de la houille blanche et des transports d'énergie électrique, par Étienne PACORET, ingénieur civil. Préface de A. BLONDEL, professeur à l'École des Ponts et Chaussées. 2^e édition, complètement remaniée et considérablement augmentée, 2 vol. de xx-1, 186 p. et viii-1, 166 p., avec 1, 336 figures et 19 pl. 55 fr. H. Dunod et E. Pinat, éditeurs, 47 et 49, quai des Grands-Augustins, Paris, vi^e.

La présente *deuxième* édition est une refonte complète de l'Ouvrage primitif, dont le succès a été si vif et dont les techniciens ont pu apprécier l'abondante documentation.

Le Tome I traite de la captation des chutes et des questions d'hydraulique et travaux de construction s'y rapportant; il se termine par la description de nombreuses usines.

La première Partie du Tome II a trait à la génération et à la transmission de l'énergie électrique ainsi qu'au contrôle du fonctionnement, à la conduite et à l'exploitation des usines.

La seconde Partie vise les applications de l'énergie électrique sous ses multiples formes.

Comme le fait remarquer M. A. Blondel dans une magistrale préface, cette seconde édition constitue une exposition didactique et une mine précieuse de renseignements concernant l'électrotechnique des usines hydro-électriques.

LISTE DES OUVRAGES

OFFERTS A LA SOCIÉTÉ INTERNATIONALE DES ÉLECTRICIENS.

(Suite.)

La Bibliothèque est ouverte aux Membres de la Société, tous les jours
de 3 heures à 6 heures, excepté les dimanches et jours de fêtes,
12, rue de Staël.

France.

- Cours municipal d'Électricité industrielle*, par L. BARBILLION. Deuxième édition revue et augmentée, avec la collaboration de P. BERGEON et M. CLARET. Tome II : *Courants alternatifs*, 2^e fascicule. Paris, L. Geisler, 1911; 1 vol. in-8, broché. (*Don de l'auteur.*)
- Électrification (L') des grandes lignes de chemins de fer*, par Jean SIGNOREL. Paris, Nancy, Berger-Levrault, 1911; 1 vol. in-8, broché. (*Don de l'éditeur.*)
- Nouveau mode d'exploitation télégraphique système Multiplex « Mercadier-Magunna »*, par H. MAGUNNA. Paris, Imprimerie Chaix, 1911; une brochure in-8. (*Don de l'auteur.*)
- Répertoire des Industries Gaz et Électricité*, par Maurice GERMAIN. Édition 1911. Paris, 7, rue Geoffroy-Marie, 1911; 1 vol. in-12, relié toile. (*Don de l'auteur.*)
- Traité théorique et pratique des machines dynamo-électriques*, par Silvanus P. THOMPSON. Traduit et adapté de l'anglais sur la 7^e édition, par E. BOISTEL, 4^e édition française. Tome I : *Courant continu*. Paris, Ch. Béranger, 1911; 1 vol. grand in-8, relié toile. (*Don de l'éditeur.*)

Étranger.

- A new type of electric furnace*, by Carl HERRING. New-York, 1911; une brochure in-8. (*Don de l'auteur.*)
- Practica de mediciones electricas. Métodos y aparatos*, par don Francisco del Rio JOAN. 2^e édition. Madrid, J. Palacios, 1910; 1 vol. in-16, cartonné toile. (*Don de M. Galan.*)
- Un lot de 14 dissertations et thèses présentées à la *Technische Hochschule* de Karlsruhe. (*Don de M. E. Arnold.*) —
-

BULLETIN

DE LA

SOCIÉTÉ INTERNATIONALE

DES

ÉLECTRICIENS.

SOMMAIRE.

Compte rendu sommaire de l'excursion faite dans le sud de la France (M. de Valbreuze), p. 399. — Sur les effets physiologiques des courants électriques (M. le Dr Weiss), p. 417. — Expériences sur l'électrocution effectuées au Laboratoire central d'Electricité par la Commission chargée d'élaborer le texte de l'instruction sur les premiers soins à donner aux victimes des accidents électriques (M. Zacon), p. 437. — Note au sujet du danger spécial des courants alternatifs provenant de la capacité (M. Guéry), p. 499.

COMPTE RENDU SOMMAIRE DE L'EXCURSION FAITE DANS LE SUD DE LA FRANCE.

Par M. DE VALBREUZE.

« Le Bureau de la Société avait organisé, du 19 au 25 mars, une excursion dans le sud de la France, pour visiter les plus nouvelles installations électriques établies dans le Lyonnais, la Savoie, le Dauphiné, et près du littoral méditerranéen. Ce voyage s'est effectué dans d'excellentes conditions et a présenté un intérêt tout particulier. Comme l'a fort bien écrit l'un des excursionnistes, M. Racapé, la plus franche cordialité a régné très vite entre les participants. Notre si aimable et si dévoué président, M. Bochet, a charmé nos heures de trajet et nous a grandement instruits en nous parlant de choses sur lesquelles il a acquis une compétence toute spéciale, notamment la construction et les applications des moteurs Diesel, et les questions relatives à la marine. M. l'ingénieur en chef Monmerqué, qui participait également à l'excursion, ainsi que le commandant Cordier, nous ont aussi fait profiter utilement de leur expérience personnelle.

(1) La Société n'est pas solidaire des opinions émises par ses Membres dans les discussions ni responsable des Notes ou Mémoires publiés dans le *Bulletin*.

» Le programme débutait par les visites de la sous-station de Vaulx-en-Vélin, près Lyon, et de l'usine génératrice de la Bridoire, en Savoie. Comme on le sait, les installations de transport d'énergie de Moutiers et de la Bridoire à Lyon ont été équipées avec le système série à intensité constante, étudié et perfectionné par M. Thury, sous le nom duquel il est maintenant bien connu. Avec son amabilité et son dévouement coutumiers, M. Thury était venu tout exprès d'Angleterre, où de très importantes installations l'occupaient alors, pour nous accompagner dans notre visite et nous expliquer tous les détails de ses ingénieux dispositifs. Nous lui devons des heures charmantes autant qu'instructives, au cours desquelles, répondant avec une inlassable bonne grâce aux multiples questions qui lui étaient posées, il nous a appris une foule de choses intéressantes. Quiconque a eu la bonne fortune de passer quelques moments avec ce savant aussi éminent que modeste comprendra combien sa compagnie a pu nous être précieuse.

» Dès notre arrivée à Lyon, nous étions accueillis par MM. Thury, Graff, directeur à la Société grenobloise de Force et Lumière, et Giraud-Teulon, ingénieur à cette même Société, qui nous emmenaient en automobiles à l'usine de Vaulx-en-Vélin, près de Villeurbanne, où nous retrouvions la plupart de nos collègues habitant Lyon.

» La sous-station de Vaulx (*fig. 1*), qui fournit à la ville de Lyon l'énergie électrique sous forme de courants triphasés à 10000 volts, est alimentée actuellement par quatre usines génératrices distinctes situées à Séchilienne (courants triphasés à 26000 volts), à Bellegarde (courants triphasés à 40000 volts), à Moutiers (courant continu à 75 ampères), et à la Bridoire (courant continu à 150 ampères).

» La station génératrice primitive du transport de Moutiers-Lyon est située près de Moutiers (Savoie), sur l'Isère. Elle comprend cinq groupes générateurs, dont un de réserve, d'une puissance de 1600 chevaux chacun. Chaque groupe est constitué par deux machines doubles, accouplées à la même turbine et fournissant une intensité constante de 75 ampères sous une tension totale maxima de 14400 volts. La puissance totale de l'usine génératrice atteint 8000 chevaux dont 6400, soit 4300 kilowatts sous 57600 volts, sont transportés à Lyon, à une distance de 180 km.

» A Lyon, l'énergie transmise est utilisée par huit moteurs série capables de fournir chacun une puissance normale de 725 chevaux, à la vitesse de 428 tours par minute. Six de ces moteurs sont installés à l'usine de la rue d'Alsace et sont accouplés à des génératrices alimentant les Tramways de Lyon. Les deux autres sont à l'Usine de Vaulx-en-Velin, où ils entraînent des alternateurs. En cas d'arrêt du transport série, ces alternateurs, reliés



Fig. 1. — Usine de Vaulx-en-Velin : vue extérieure de l'usine. Située à Villeurbanne, sur le territoire de Vaulx-en-Velin, l'usine transforme l'énergie reçue par les lignes aériennes de Bellegarde (triphase 40 000 volts), Grenoble (26 000 volts) et Moutiers (continu série, anciennement 75 ampères et max. 50 000 volts) et la distribue à Lyon par câbles, partie en série aux tramways, le reste en triphasé 10 000 volts. L'augmentation du transport série à 150 ampères et sous une tension atteignant 100 000 volts a nécessité l'adjonction à l'ancienne usine (qu'on voit en arrière) de la salle de machines du premier plan, avec les arrivées de fil sur le toit.

au réseau triphasé fonctionnent comme moteurs, les machines série deviennent génératrices et alimentent les moteurs de la rue d'Alsace.

» Cette première installation, qui fonctionne avec une intensité constante de 75 ampères et une tension maxima de 57 600 volts, a été mise en service en 1906, et les bons résultats qu'elle a donnés déterminèrent les Sociétés intéressées à en étendre l'application.

» Les extensions, actuellement réalisées ou en cours de réalisation, doivent comprendre :

» 1^o L'installation à la Bridoire d'une station génératrice contenant quatre groupes générateurs composés chacun de deux inducteurs montés sur un bâti commun à trois paliers et de deux induits clavetés sur le même arbre : chaque groupe est capable d'absorber, à la vitesse de 428 tours par minute, une puissance

de 2000 chevaux en fournissant 150 ampères sous la tension maxima de 9125 volts.

» L'installation à Vaulx-en-Velin de trois moteurs doubles, exactement semblables aux génératrices, et capables de fournir chacun une puissance de 1730 chevaux à la vitesse de 428 tours par minute en absorbant 150 ampères sous 9125 volts.

» Pendant cette première période, c'est-à-dire à l'heure actuelle, le transport s'effectue en deux circuits distincts : l'un est constitué par l'usine de Moutiers fonctionnant à 75 ampères et 57 600 volts à pleine charge, et par les moteurs de 725 chevaux des usines de Vaulx-en-Velin et de la rue d'Alsace : l'autre est formé de l'Usine de la Bridoire travaillant à 150 ampères sous 24 000 volts au maximum et alimentant les nouveaux moteurs de 1730 chevaux de l'usine de Vaulx-en-Velin.

» 2^o Les machines primitives de Moutiers et de Lyon seront ensuite couplées par deux en parallèle pour fonctionner à 150 ampères, et l'usine de Moutiers, dont la tension se trouvera ainsi réduite à 28 800 volts, sera couplée en série avec celle de la Bridoire. Tout l'ensemble formera donc une seule boucle.

» 3^o Au commencement de 1912, on mettra en service l'usine de la Rozière à Bozel (Savoie) actuellement en construction : elle comprendra trois groupes générateurs, dont un de réserve, composés chacun de deux machines doubles, semblables à celles de l'usine de la Bridoire. Chaque groupe générateur pourra absorber, à la vitesse de 428 tours par minute, une puissance de 4000 chevaux, en débitant 150 ampères sous 18 250 volts.

» A l'usine de Vaulx-en-Velin, on montera deux nouveaux moteurs doubles de 1730 chevaux, puis, dans la suite, deux autres moteurs semblables. Finalement, cette usine comportera, en plus des deux machines primitives de 725 chevaux, sept moteurs de 1730 chevaux à 428 tours.

» En résumé, une fois les nouvelles installations en service, la puissance totale fournie à Lyon par les trois usines génératrices couplées en série pourra atteindre 15 000 kilowatts, soit 150 ampères sous 100 000 volts.

» D'après ce qui précède, on voit que l'usine actuelle de Vaulx-

en-Velin, comprend trois parties distinctes : d'une part, un poste de transformateurs destinés à abaisser de 26 000 volts ou de 40 000 volts à 10 000 volts la tension des courants triphasés produits à Séchilienne ou à Bellegarde; d'autre part (à gauche de la figure 2), un groupe de machines rotatives chargées de convertir en courants triphasés l'énergie provenant de Moutiers sous forme de courant continu (ces moteurs sont en série avec ceux de la rue d'Alsace); et enfin un groupe de machines rotatives (*fig. 2, 3 et 4*) ⁽¹⁾, destinées à convertir en courants triphasés l'énergie provenant de la Bridoire sous forme de courant continu.

» Le principal intérêt de la visite consistait dans l'examen de ces machines, dont les dernières surtout sont tout à fait remarquables. Chaque unité comprend, comme le montrent bien les figures,

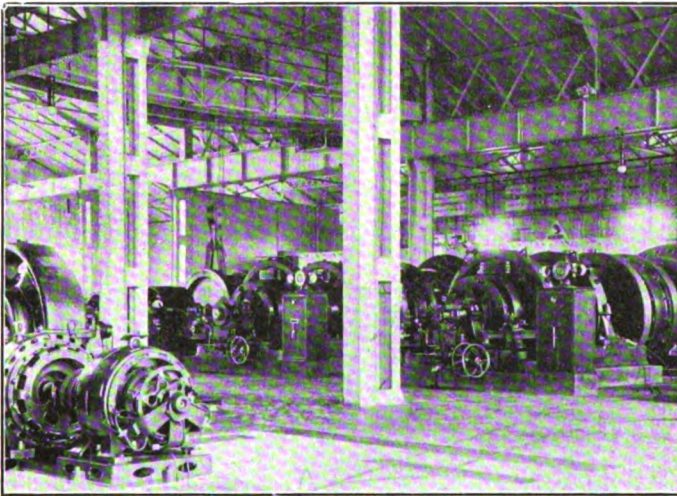


Fig. 2. — Usine de Vaulx-en-Velin : au premier plan, à gauche, une excitatrice; derrière, un ancien groupe série 75 ampères 500 kilowatts; au fond, nouveaux moteurs série 150 ampères et 9000 volts attaquant des alternateurs à 10000 volts triphasés.

deux moteurs à courant continu de 150 ampères, sous 4500 volts maxima par collecteur, accouplés par un joint Raffard à un alternateur triphasé de 10 000 volts. Ces machines sont montées sur des fondations complètement isolées par un bitume spécial, dont l'isolement est prévu pour une tension bien supérieure à celle qui

⁽¹⁾ Toutes ces photographies ont été prises par notre très obligeant et habile collègue, M. Giraud-Teulon, ancien élève de l'École supérieure d'Électricité.

correspond à la pleine charge totale. La puissance des moteurs est réglée automatiquement par décalage des balais : ceux-ci

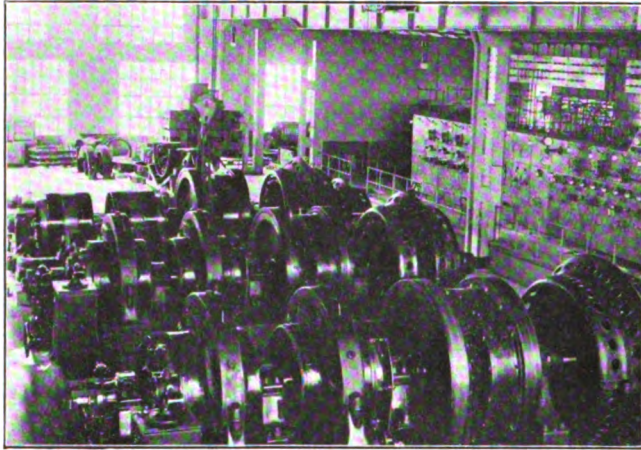


Fig. 3. — Usine de Vaulx-en-Velin : partie neuve ; mêmes machines. Le tableau triphasé 10000 volts. Les machines série n'ont pas de tableau : une colonne portant volt- et ampèremètre suffit. On les met en circuit au moyen d'interrupteurs tournants qui, au repos, court-circuitent séparément ligne et machine. Le tout dans l'huile, en sous-sol. L'alimentation dans l'usine se fait en câbles isolés pour 100000 volts.

peuvent être déplacés, sans présenter aucun crachement, depuis la ligne neutre jusqu'à la position opposée, pour laquelle le mo-

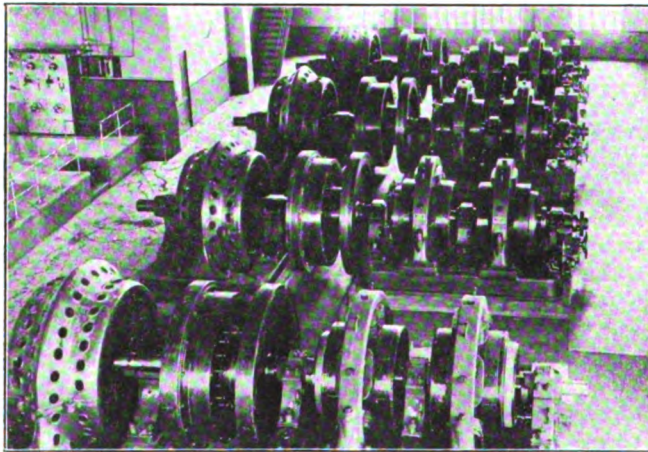


Fig. 4. — Usine de Vaulx-en-Velin : partie neuve. Vue semblable, côté série : on voit les moteurs, leurs colonnes, régulateurs, etc., les socles isolés à l'asphalte, et à gauche les alternateurs avec les manchons d'accouplement à courroie, isolés à 100000 volts, qui relient les volants.

teur s'arrête. Le régulateur automatique qui commande la rotation des balais est actionné par un tachymètre agissant sur un servo-

moteur à huile. L'appareillage relatif aux machines à courant continu consiste simplement en interrupteurs de court-circuit, avec dispositifs à cornes pour absorber l'étincelle d'extra-courant des inducteurs série.

» Le cadre restreint de ce compte rendu ne nous permet pas de décrire les installations des parafoudres, des limiteurs et des tableaux, qui sont établis d'une façon tout à fait moderne, et avec un soin remarquable.

*
* * *

» La journée du lendemain était consacrée à la visite de l'usine génératrice de la Bridoire (Savoie) alimentée par les eaux du lac d'Aiguebelette et pourvue d'un bassin de compensation.

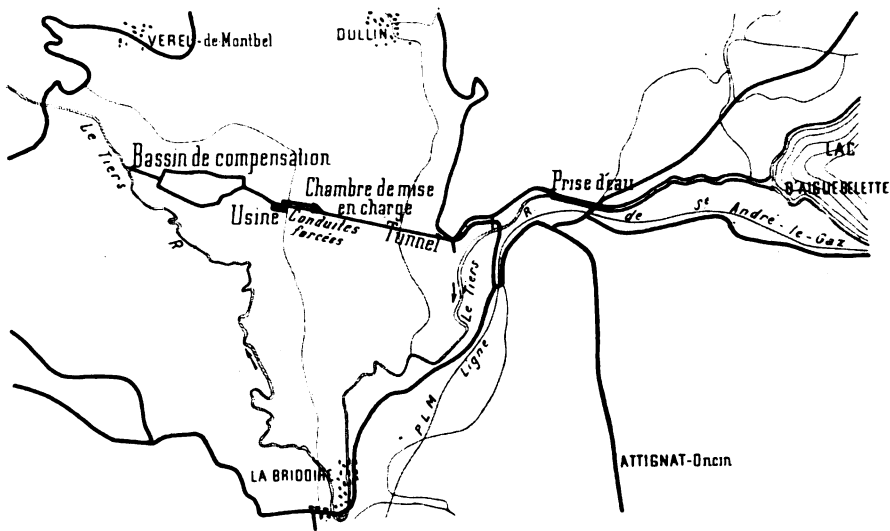


Fig. 5.

» A la gare de Saint-Béron, nous étions rejoints par M. Baillat, administrateur délégué de la Société hydro-électrique du Guiers : notre collègue nous a donné d'intéressants renseignements sur la constitution de l'usine de Saint-Béron et sur le fonctionnement de son entreprise qui, chargée d'assurer la distribution de l'énergie jusqu'à Morestel, a prospéré suffisamment pour pouvoir rembourser en totalité son capital initial. Pendant tout le cours du voyage, auquel il a pris part, M. Baillat nous a fait profiter, par

une foule de remarques personnelles, de sa très grande expérience pratique des usines hydro-électriques et des questions connexes; sa présence nous a été infiniment utile à ce point de vue.

» De la gare de Saint-Béron, M. de Rouville, administrateur délégué de la Société hydroélectrique de la Bridoire, nous a conduits en automobiles à l'usine, où nous attendaient les directeurs et ingénieurs de l'entreprise, MM. Waldvogel, Morgenthaler, Pison, Siegfried.

» L'usine de la Bridoire (*fig. 5, 6, 7*) est située au pied d'une petite montagne dont le flanc escarpé présente à mi-côte l'ouverture du tunnel amenant les eaux du lac d'Aiguebelette. De ce point partent les conduites forcées qui alimentent les machines.

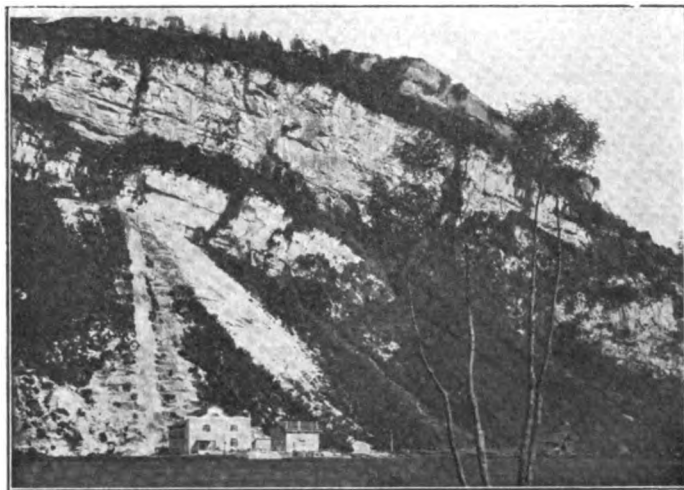


Fig. 6. — Usine génératrice de la Bridoire, destinée à fournir du courant continu à 150 ampères sur la ligne Moutiers, Bozel, Vaulx-en-Velin, qu'elle alimente au village de Novalaise. On voit l'usine, la saignée remblayée dans la montagne, où se cachent les deux conduites d'amonée d'eau et la sortie du tunnel qui rejoint le lac de l'autre côté. Le canal de décharge, sur la rive duquel la photographie a été prise, traverse un marais entre deux digues.

Celles-ci sont au nombre de quatre (*fig. 8 et 9*) : chacune d'elles comprend une turbine (*fig. 10*), prévue pour 120 m de chute, et deux machines série à courant continu (*fig. 11*) de 150 ampères et 4565 volts au maximum par collecteur. Ces génératrices sont semblables en tous points aux nouvelles motrices de l'usine de Vaulx-en-Velin. L'intensité est maintenue constante à 150 ampères par un régulateur général agissant sur les servomoteurs à huile

qui ont pour fonction de décaler les balais : la différence de potentiel produite peut ainsi varier entre zéro et sa valeur maxima,

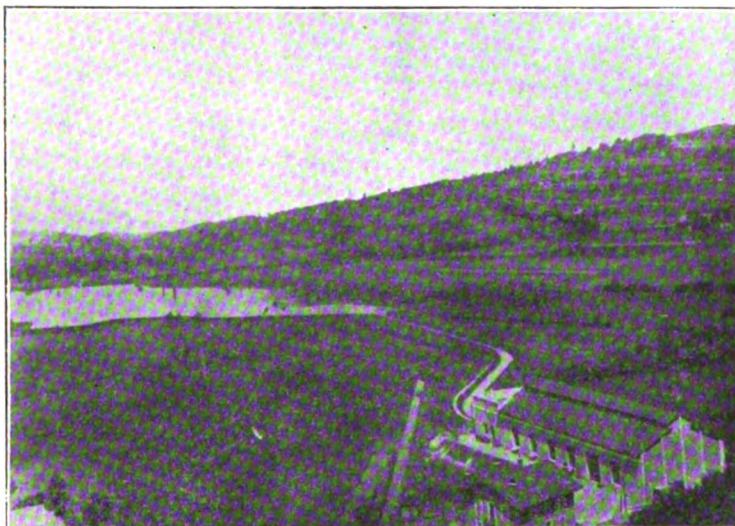


Fig. 7. — Usine de la Bridoire : vue de l'usine et du bassin de compensation.

suivant la charge; un léger shuntage des inducteurs, qui se pro-

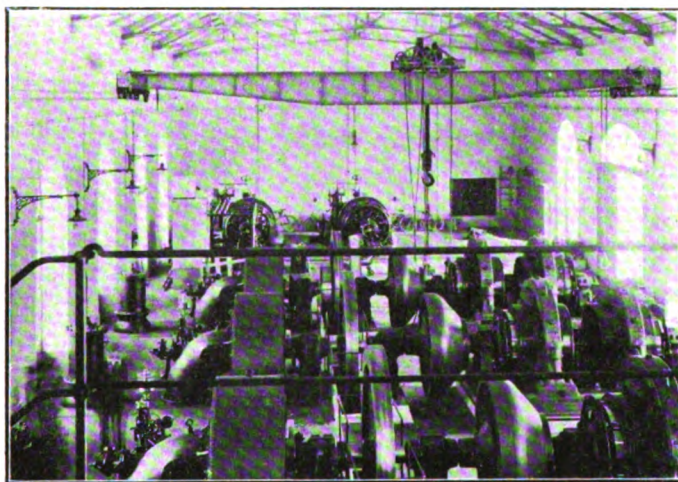


Fig. 8. — Vue intérieure de l'usine de la Bridoire : quatre groupes identiques à ceux de Vaulx. 150 ampères et 9000 volts max. entraînés à vitesse constante par des turbines Piccard; réglage automatique par le calage des balais commandés par un servomoteur à huile. Manchons Raffard à glissement isolés à 100000 volts. Dans le fond deux groupes d'alternateurs alimentant la région en triphasé 2000 volts.

duit automatiquement lors du décalage des balais, assure la con-

stance du champ au droit de ceux-ci et évite ainsi tout crachement.

» La salle des machines contient, en outre, deux alternateurs triphasés destinés à l'alimentation de la région voisine, sous une tension de 2000 volts.

» La ligne aérienne reliant la Bridoire à Vaalx-en-Velin a une longueur d'environ 100 km : sa résistance totale est d'environ

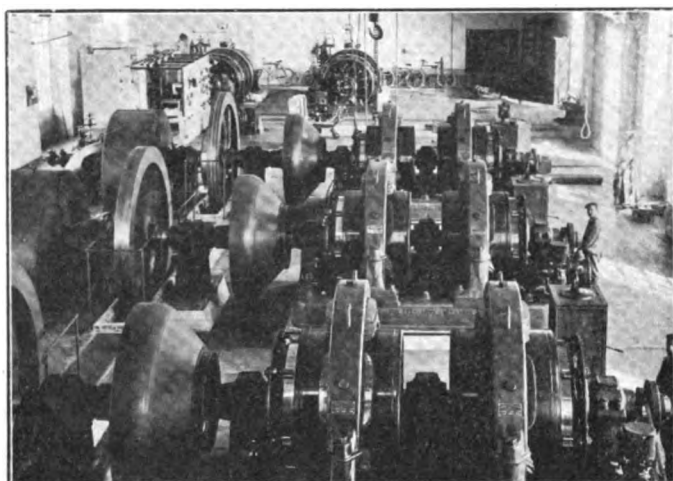


Fig. 9. — Vue intérieure de l'usine de la Bridoire.

45 ohms. La protection est assurée par des groupes de parafoudres série du système Thury à soufflage magnétique et par des bobines de self-induction établies avec des conducteurs en fer. Il y a, en outre, des condensateurs. En cas de court-circuit brusque ou de rupture en ligne, chaque machine est mise automatiquement en court-circuit d'une façon progressive. Normalement, l'intensité du courant sur la ligne est maintenue constante, à quatre ampères près, par un régulateur qui commande toutes les machines.

» Les différentes manœuvres de mise en charge et d'arrêt d'un ou plusieurs groupes ont permis aux visiteurs de se rendre compte de la très grande facilité de conduite et de réglage de ces installations, et ont montré à quel point le système série est simple et pratique.

Quand nous eûmes visité en détail l'usine génératrice, les dirigeants de la Société hydro-électrique de la Bridoire nous offrirent

un excellent et plantureux déjeuner auquel assistèrent tous les

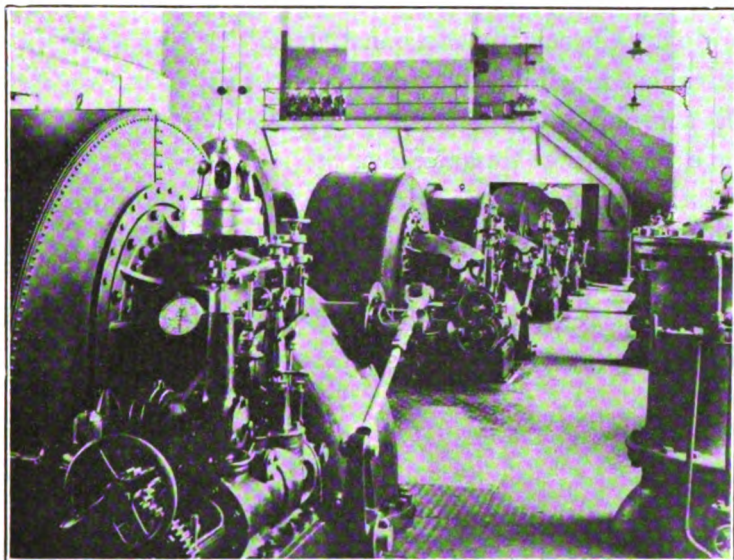


Fig. 10. — Usine de la Bridoire : vue des quatre turbines actionnant les génératrices série.

ingénieurs de la Société et ceux de la Société grenobloise. Au cours

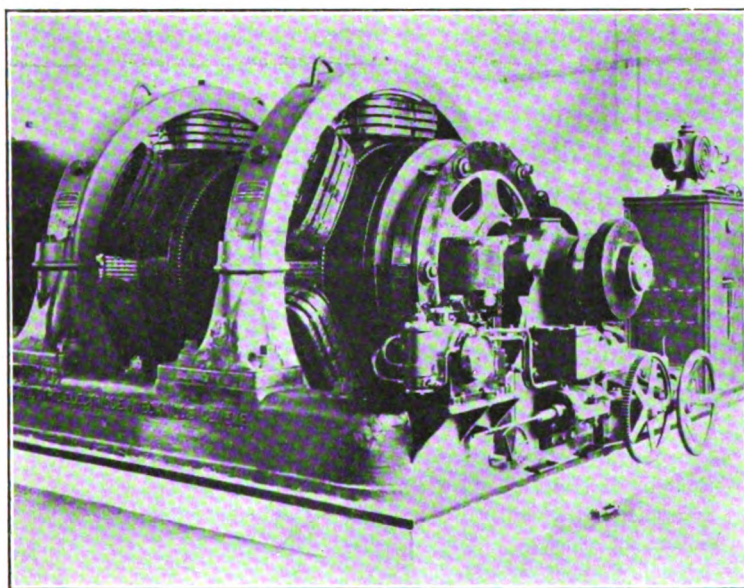


Fig. 11. — Usine de la Bridoire : dynamo double à courant continu, 150 ampères, 9000 volts max.

de ce repas, nous avons apprécié, une fois de plus, l'énorme profit que l'on peut tirer de la fréquentation d'ingénieurs, tels que

MM. Thury, Waldvogel et leurs collaborateurs. Répondant à nos multiples questions, ils nous ont appris ou expliqué un grand nombre de détails relatifs à la construction et aux applications de ces admirables machines à courant continu à haute tension, dont l'emploi semble devoir s'étendre prochainement aussi dans le domaine des mines et des aciéries.

» Après le déjeuner, nos aimables hôtes nous conduisirent en automobiles au pittoresque lac d'Aiguebelette, pour voir la prise d'eau, puis à la gare de Lépin, où nous prîmes notre train. Je ne saurais trop les remercier, au nom de tous les participants, de la très charmante et très intéressante journée qu'ils nous ont fait passer.

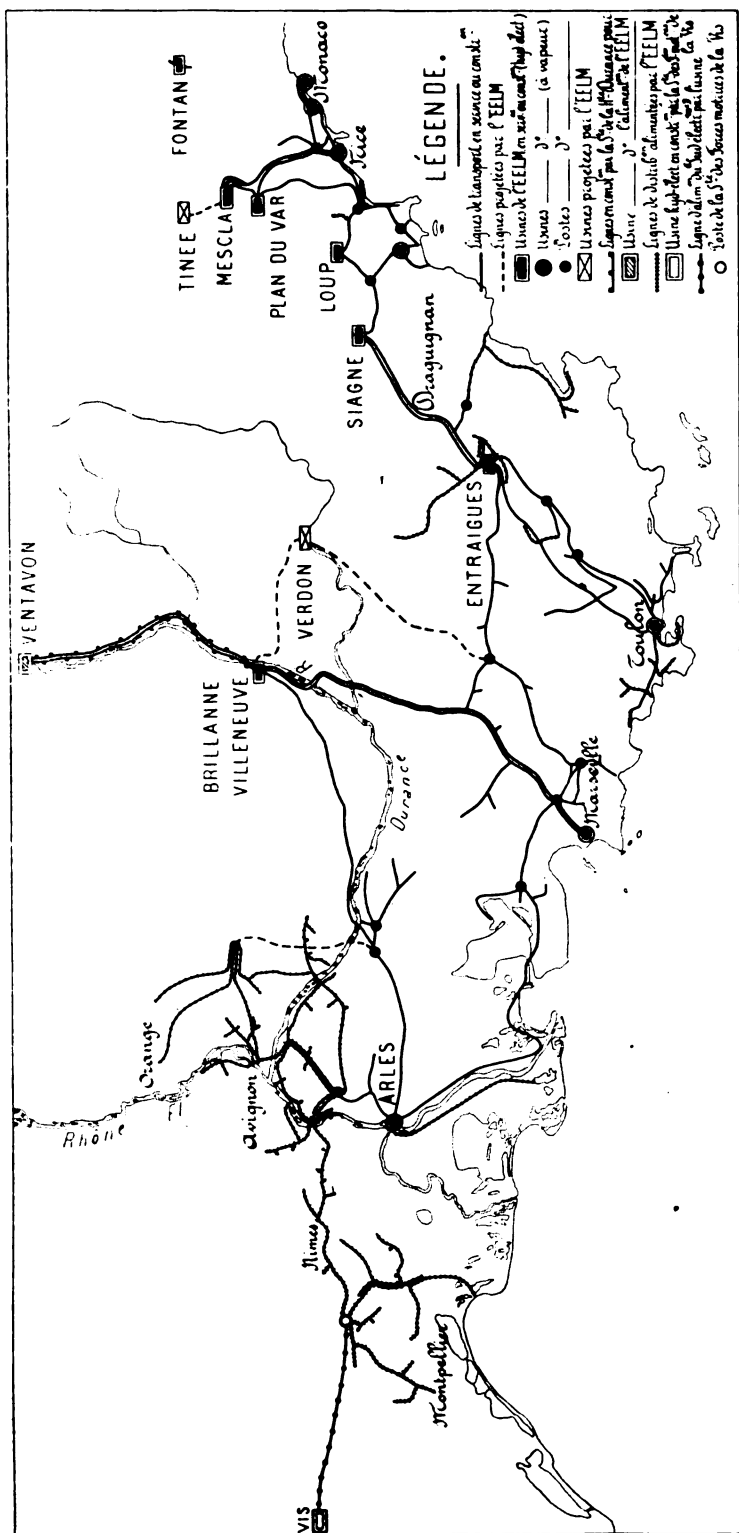
*
* *

» L'excursion comprenait ensuite la visite des principales installations de la Société « l'Énergie électrique du littoral méditerranéen », qui ont été pour la plupart décrites en détail dans les Revues techniques et sur lesquelles nous nous contenterons de donner des indications sommaires.

» La Carte reproduite par la figure 12 donne une idée du réseau complet et des principales usines génératrices ou transformatrices de la Société. Parmi celles-ci, nous avons visité les plus importantes, soit celles de Ventavon, la Brillanne, le Loup et la Siagne.

» Notre arrivée à Ventavon a eu lieu dans l'après-midi du 21 mars, après le magnifique parcours de Grenoble à Laragne. Nous avons visité avec beaucoup d'intérêt, sous la conduite de M. Borellis, cette très intéressante usine, dont il a été malheureusement impossible d'obtenir des photographies. Ses principales caractéristiques sont résumées dans le Tableau ci-dessous :

Longueur du canal de dérivation.	14 km.
Hauteur de chute.	50 m.
Puissance installée.	4 unités de 4500 kw.
Nature du courant.	triphasé.
Tension aux machines.	7500 volts.
Fréquence.	25 périodes.
Transformateurs.	monophasés, à bain d'huile.
Tension de transmission.	55000 volts.
Lignes de transmission.	2, vers la Brillanne.
Constitution des lignes.	aluminium.



» Comme à l'usine plus ancienne de la Brillanne, le bâtiment des transformateurs et des interrupteurs est absolument indépendant du bâtiment où sont installées les machines motrices et génératrices. Les tableaux sont établis d'une façon tout à fait moderne avec appareils à basse tension à relais et à servomoteurs. Ces dispositifs sont trop connus maintenant des électriciens pour qu'il soit nécessaire de s'y arrêter.

*
* *

» Le lendemain, 22 mars, était consacré à la visite de l'usine de la Brillanne (*fig. 13 et 14*), sous la direction de M. Laporte, directeur des réseaux. Le Tableau suivant résume les caractéristiques de cette installation ⁽¹⁾ :

Longueur du canal de dérivation.	7 km.
Hauteur de chute.	22 m.
Puissance installée.	5 unités de 3000 kw.
Nature du courant.	triphase.
Tension aux machines.	7500 volts.
Fréquence.	25 périodes.
Transformateurs.	monophasés à bain d'huile.
Tension de transmission.	52 000 volts.
Lignes de transmission.	2, vers Marseille. 1, vers Arles.
Constitution des lignes.	aluminium et cuivre.

*
* *

» Après avoir couché à Marseille, nous nous sommes dirigés vers Toulon, où nous attendait notre aimable vice-président M. Maugas, le très distingué Ingénieur en chef de la Marine. Grâce à son extrême obligeance, nous avons passé là une journée des plus instructives et des plus agréables, au cours de laquelle nous avons pu constater avec une joie sincère que nos Ingénieurs du Génie maritime et nos Marins sont à hauteur de leur tâche et savent réaliser et utiliser de remarquables engins. Nous avons admiré d'abord les installations du nouveau cuirassé *Voltaire*,

(1) Des descriptions détaillées de l'usine de la Brillanne ont été données par la presse technique et par la Compagnie Thomson-Houston (*Bulletin* du 15 mars 1908).



Fig. 13. — Usine de la Brillanne.

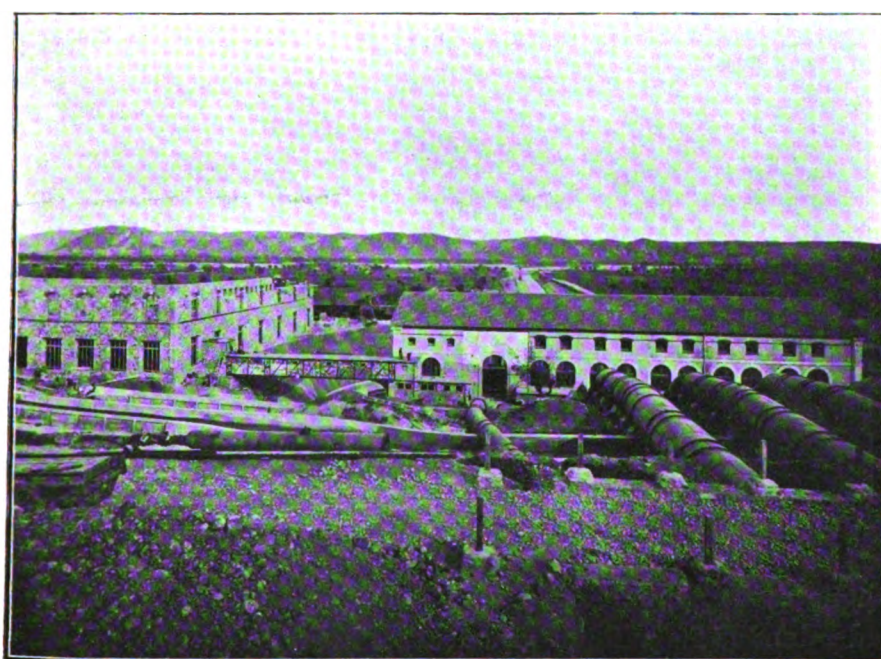


Fig. 14. — Vue de l'usine génératrice de la Brillanne
et de son poste de transformateurs (à gauche).

en finition à la Seyne, et nous avons vu avec satisfaction les services multiples que rend l'électricité à bord d'un navire de guerre moderne. Ensuite, nous avons visité en détail les chantiers de la Société des Forges et Chantiers de la Méditerranée, sous la conduite de son très aimable directeur, M. Rimbaud, après quoi nous avons déjeuné à Tamaris. L'après-midi a été consacré à la visite de l'Arsenal, des cales sèches, des chantiers de construction du Mourillon et de la ville où M. Maugas nous a pilotés avec une inlassable bonne grâce. Je tiens à lui en exprimer notre très vive et très sincère reconnaissance.

*
* * *

» Le lendemain, 24 mars, nous gagnions Cannes, où nous attendait un car alpin automobile, pour aller visiter les usines de la



Fig. 15. — Usine de la Siagne.

Siagne et du Loup. Nous avons fait là une merveilleuse promenade, dans ce magnifique pays dont les figures 15, 16 et 17 donnent une idée. Les Tableaux suivants résument les caractéristiques de ces deux usines :



Fig. 16. — Usine du Loup.

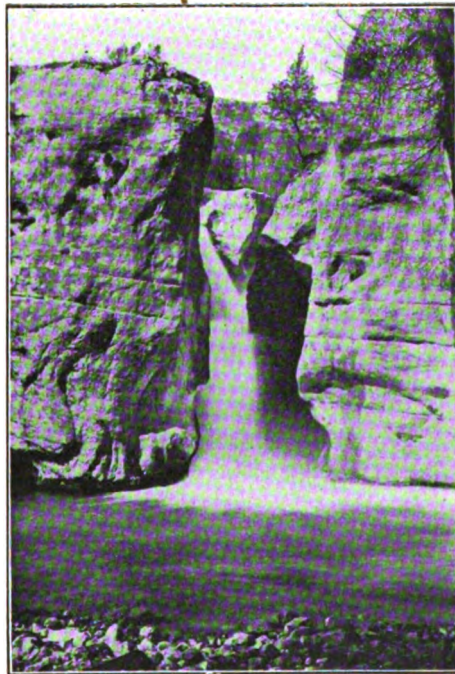


Fig. 17. — Le Saut du Loup.

Usine de la Siagne.

Longueur du canal de dérivation.	7 km.
Hauteur de chute.	350 m.
Puissance installée.	5 unités de 1500 kw.
Nature du courant.	triphase.
Fréquence	25 périodes.
Tension aux machines.	10000 volts.
Transformateurs.	monophasés.
Tension de transmission.	30000 volts.
Lignes de transmission.	2, vers Toulon.
Constitution des lignes.	cuivre.

Usine du Loup.

Longueur du canal de dérivation.	3,800 km.
Hauteur de chute.	250 m.
Puissance installée.	4 unités de 600 kw.
Nature du courant.	triphase.
Tension aux machines.	10000 volts.
Fréquence.	25 périodes.
Tension de transmission	10000 volts.

Un transformateur monophasé à 6500 volts alimente les tramways départementaux.

» Le voyage en groupe prenait fin à Cannes; après cette charmante journée, les excursionnistes avaient la latitude d'aller se reposer quelques jours à Nice, et presque tous en profitèrent.

*
*
*

» La satisfaction manifestée par les coparticipants de cette excursion, tant au cours du voyage que par les lettres de remerciements qu'ils ont eu l'amabilité de m'adresser, montrent le succès très réel qu'elle a obtenu et l'intérêt que présentent les voyages d'études de ce genre. A côté des avantages d'ordre technique qu'on y trouve, ils ont pour effet de resserrer parmi les membres les liens de solidarité et de camaraderie, de permettre entre techniciens et spécialistes de diverses usines des échanges de vues tout à fait profitables, d'établir une liaison effective entre nos collègues de province et ceux de Paris, et enfin d'attirer à nous de nouveaux adhérents qui, lors du passage des excursionnistes, se rendent compte de l'activité de notre Société et de l'intérêt que présentent ses travaux. »



TRAVAUX DU LABORATOIRE CENTRAL D'ÉLECTRICITÉ.

SUR LES EFFETS PHYSIOLOGIQUES DES COURANTS ÉLECTRIQUES.

Par M. le Dr WEISS.

« Messieurs. Le sujet que je vais avoir l'honneur d'exposer devant vous n'est pas de ceux que vous entendez traiter d'habitude ici. Cependant plusieurs de nos collègues, M. Hillairet, M. Boucherot, M. Janet, entre autres, ont pensé que vous pourriez y prendre quelque intérêt. D'ailleurs cette communication vous est due, car les expériences dont il sera question dans un instant n'ont pu être exécutées que grâce à l'attribution du legs Cheux dont la Société internationale des Électriciens a bien voulu nous faire bénéficier l'année dernière, et aux ressources du Laboratoire central d'Électricité que M. Janet avait mis aimablement à notre disposition, ce qui nous a permis de mener nos travaux à bonne fin. Nous y avons trouvé non seulement le matériel électrique indispensable, mais aussi le concours précieux de M. David, qui a collaboré à toutes les expériences, et que je tiens à remercier publiquement pour l'aide dévouée qu'il nous a apportée.

» Parmi les divers accidents qui peuvent se produire, celui qui est dû à l'électricité industrielle mérite une place à part par sa fréquence, par son imprévu et par le drame secondaire qui l'accompagne parfois. Un ouvrier tombe d'une maison en construction : il savait, et tout le monde savait avec lui, quel était le danger auquel il s'exposait en montant sur un échafaudage. Une fois l'ouvrier tombé, les assistants voient immédiatement ce qu'il y a à faire : cela est du reste généralement fort simple : on le ramasse, on le met sur une civière et on l'emporte à l'hôpital ou chez lui.

» Dans un grand nombre de cas, l'accident électrique s'accompagne d'une scène bien différente. Les courants dangereux ne se sont pas encore assez répandus et surtout la population ne les connaît pas depuis assez longtemps pour savoir à quel point ils

sont redoutables. Un conducteur transmettant un courant de tension relativement élevée ne diffère pas assez de l'innocent fil télégraphique pour inspirer tout le respect qui lui est dû. On ne voit pas le danger. Et si un imprudent s'y laisse prendre, il ne se présente pas toujours un accident bref et rapidement terminé : c'est souvent alors que la victime est encore vivante, que la partie la plus angoissante de la scène va se dérouler. Vous le savez tous, ce n'est pas le manque de bravoure qu'on peut reprocher à nos populations ouvrières ou autres, et il n'y a pas d'exemple qu'il se produise un accident quelconque sans que de généreux sauveteurs interviennent au péril de leur vie.

» L'intervention dans le cas d'un accident électrique est particulièrement dangereuse et l'on ne compte plus les cas où, après une première victime, un, deux, ou trois sauveteurs se font prendre à leur tour.

» Et ces faits se multiplient de plus en plus, à mesure que les réseaux s'étendent à tout le territoire, le long des voies de communication et dans les plus petites bourgades, en même temps que les tensions s'élèvent et que, par suite, le danger augmente.

» Il suffira, pour comprendre les préoccupations des pouvoirs publics à cet égard, de citer quelques chiffres.

» En 1905, une statistique opérée par le service de l'inspection du travail, portant sur des périodes variables suivant les circonscriptions, mais dont la durée est comprise entre 2 et 7 années, a permis de retrouver 515 accidents dus aux courants électriques.

» Ces accidents se décomposaient comme suit :

Accidents mortels	30
Accidents donnant lieu à une incapacité permanente	13
— temporaire ..	450
Accidents dont les suites sont inconnues	22
Total	515

» Presque tous les accidents mortels sont causés par le courant alternatif, trois seulement étaient certainement dus au courant continu.

» Si maintenant nous arrivons aux statistiques plus récentes nous trouvons :

Suites.

	Mort.	Incapacité permanente.	Incapacité temporaire.	Inconnues.	Totaux.
1907.....	28	15	518	10	571
1908... ..	26	4	714	29	773
1909... ..	33	14	714	17	778

» On conçoit que M. le Ministre des Travaux publics ait jugé nécessaire de réviser les anciens règlements sur les secours à donner aux victimes, et sur les précautions à prendre par les sauveteurs pour ne pas accroître le désastre.

» Cette Commission, dont la composition est indiquée en tête du rapport rédigé par M. Zacon, et présenté par elle à M. le Ministre, a siégé pendant plus de deux ans : c'est en son nom que je prends la parole aujourd'hui et je vais vous exposer, en les motivant, les conclusions auxquelles elle est arrivée.

» Certaines d'entre elles pourront peut-être être critiquées, car l'on ne peut contenter tout le monde; ce que nous pourrions affirmer, c'est qu'aucune d'elles n'a été formulée qu'après des discussions approfondies auxquelles ont pris part des électriciens comme MM. Boucherot, Hillairet, Janet, Brylinski..., j'en passe, et des meilleurs; et, si notre œuvre offre certaines imperfections, c'est qu'il est presque impossible de prévoir tous les cas qui peuvent se présenter, et qu'il nous a paru prudent de ne conseiller que des manœuvres de tout repos si elles sont rigoureusement observées.

» Messieurs, j'ai dit que l'accident électrique était particulièrement dramatique et affolant; il est aussi, au premier abord, déconcertant tant au point de vue médico-légal que physiologique.

» Voici une victime; un homme a été accidentellement frappé par le courant, parfois à tension relativement faible et, pourtant, il ne nous reste qu'un cadavre. Ce cadavre ne porte aucune trace extérieure; à l'autopsie, on ne trouve rien; les anatomo-pathologistes les plus experts ne relèvent aucune lésion pouvant expliquer la mort. Et voici un autre cas, l'accident a pu être terrible, les parties du corps en contact avec les conducteurs électriques portent de vastes escharres, parfois les brûlures sont si profondes que les os sont à découvert, de véritables amputations ont pu en résulter, et le sujet est vivant. Je connais un cas, et il n'est cer-

tainement pas isolé, ou un malheureux a perdu les deux avant-bras et les deux jambes et dont la santé générale n'a pas été altérée.

» Quelle contradiction ! Il est impossible cependant, avec des résultats si dissemblables, d'en chercher une interprétation dans une soi-disant susceptibilité individuelle.

» Les sources auxquelles nous pouvons nous adresser pour trouver une explication sont au nombre de quatre.

» *Les cas de fulguration.* — Il n'y a rien à en tirer. D'abord, les observations sont imparfaites par suite du défaut d'assistant compétent, et puis le coup de foudre est d'ordre complètement différent du courant industriel. Nous pourrions peut-être, dans la suite, nous expliquer la mort par fulguration, mais il est impossible de la prendre comme point de départ pour trouver cette explication même.

» *Les accidents* ne sont pas susceptibles non plus de nous éclairer, par suite de l'imperfection des observations, conséquence naturelle des conditions dans lesquelles ils se produisent.

» *Les électrocutions d'Amérique.* — Les observateurs sont compétents, ce sont presque des expériences de laboratoire, mais l'étude sérieuse des courants par intensité croissante nous fait défaut, le but étant de tuer à coup sûr. Ici encore, nous ne pourrions que donner finalement l'explication des faits observés et en particulier des succès obtenus.

» *Les expériences de laboratoire* sur les animaux peuvent seules nous permettre une étude complète et méthodique des effets du courant. Il restera certainement une objection. Les résultats obtenus sur les animaux sont-ils applicables à l'homme ? C'est une question que je discuterai, après vous avoir exposé les conclusions auxquelles on est arrivé par l'expérimentation sur le chien.

» Messieurs, pendant longtemps, sous l'empire de cette idée que l'électricité a une action particulièrement active et élective sur le système nerveux, les observateurs recherchaient systématiquement, et pour ainsi dire exclusivement, la cause des accidents mortels dans des troubles du système nerveux central, en particulier du bulbe.

» On cherchait à électrocuter des animaux; on constatait des altérations plus ou moins graves de la respiration; quand l'animal succombait, on faisait l'autopsie et l'on recherchait si, dans les centres nerveux, ne se trouvait pas quelque légère altération, se réduisant, dans les cas heureux, à une minime hémorragie capillaire insuffisante pour expliquer la mort, mais dont il fallait se contenter, faute de mieux.

» Cependant, certains observateurs arrivèrent à une conclusion différente. Pour eux, c'était le cœur le point sensible, et l'accident mortel se produisait par arrêt de l'organe central de la circulation. Je ne ferai pas l'historique complet de la question. Je me bornerai à rappeler que ce sont Prévost et Battelli, qui, à la suite de nombreuses expériences, ont montré les premiers que, suivant les cas, la cause première de la mort était, tantôt un arrêt du cœur en trémulations fibrillaires, tantôt une inhibition des centres nerveux, avec arrêt de la respiration.

» L'ensemble de leurs expériences, pour ce qui concerne le chien pouvait se résumer ainsi :

» Pour les courants alternatifs de fréquence habituelle, c'est-à-dire de fréquence industrielle, si la mort se produit pour un courant circulant sous une tension inférieure à 120 volts, elle est due à un arrêt du cœur en trémulations fibrillaires. L'arrêt de la respiration est consécutif à celui du cœur.

Si la mort se produit pour un courant de tension supérieure à 1200 volts, c'est l'inhibition des centres nerveux et l'arrêt de la respiration qui entrent d'abord en jeu, c'est consécutivement seulement que le cœur s'arrête. Entre 120 volts et 1200 volts, les deux phénomènes se produisent simultanément.

» Prévost et Battelli opéraient en plaçant une des électrodes dans le rectum du chien, l'autre dans la bouche : l'animal était ainsi traversé par le courant dans toute sa longueur. Je laisse de côté les expériences faites sur d'autres animaux, lapins, cobayes, etc.

» La Commission se jugeant insuffisamment éclairée pour résoudre divers points importants, résolut de reprendre les expériences d'électrocution et, comme je l'ai dit plus haut, ces expériences furent faites au Laboratoire central d'Électricité.

» Elles portèrent toutes sur le chien. L'animal était ficelé sur

une planche bien sèche et, dans une première série de recherches, était chloralosé, de façon à rester immobile.

» On lui plaçait ensuite dans la trachée sectionnée une canule en T dont une des branches rétablissait la continuité de façon à lui permettre de respirer normalement, l'autre branche était reliée à un tambour de Marey qui inscrivait sur un cylindre enregistreur toutes les variations de la respiration (*Voir les graphiques*).

» Sur ce même cylindre, on enregistrait simultanément les variations de la pression artérielle par l'intermédiaire d'un manomètre à mercure muni d'un flotteur et relié par un tube en caoutchouc à paroi épaisse à une canule fixée dans l'artère crurale.

» Enfin, un signal de Marcel Deprez marquait les durées de passage du courant auquel l'animal était soumis.

» Ce signal se trouvait dans un circuit qui se fermait en même temps que celui de l'animal.

» Dans cette première série de recherches, le courant alternatif était fourni par le secteur de la rive gauche (fréquence, 42 périodes par seconde); on en élevait ou l'on en abaissait la tension au moyen de transformateurs appropriés.

» Un voltmètre thermique donnait la tension aux points d'entrée et de sortie du courant dans le corps du chien, et un ampèremètre thermique ou électrodynamique permettait de lire directement l'intensité.

» Nous avons attaché la plus grande importance à cette détermination de l'intensité. Il est en effet très vraisemblable, *a priori*, que c'est de cette intensité et non de la tension que dépendront les effets du courant. Battelli l'avait déjà fait remarquer; néanmoins, dans toutes les expériences faites jusqu'ici, les conditions expérimentales sont toujours exprimées en fonction de la tension.

» Voyons maintenant quels sont les résultats obtenus dans ces conditions. Le mieux est d'examiner quelques tracés; je les ai rangés par ordre d'intensité croissante du courant et ils représentent bien l'ensemble des résultats obtenus.

» *Premier tracé.* — Voici un premier tracé (*Pl. I*) : le papier, comme dans toutes les expériences suivantes du reste, se déroule avec une vitesse de 1 mm à la seconde. A la partie supérieure,

vous voyez le tracé de la pression sanguine, dont il faudrait en réalité doubler les amplitudes, le manomètre enregistreur étant à deux branches égales et le mercure descendant, bien entendu, d'un côté pendant qu'il monte de l'autre.

» Au-dessous, se trouve le tracé des mouvements respiratoires, et à la partie inférieure s'enregistre la durée de passage du courant.

» Cette expérience portait sur un chien de 22 kg, chloralosé; les électrodes, constituées par du papier d'étain recouvert de coton hydrophile mouillé, étaient appliquées, bien serrées, sur la patte antérieure droite et la patte postérieure gauche tondues et mouillées. La tension était de 42 volts, on fit passer le courant pendant 50 secondes et l'ampèremètre marqua 42 milliampères.

» Que s'est-il passé ?

» Aussitôt le courant lancé, tous les muscles sont entrés en contraction énergique, à une expiration brusque ont succédé des mouvements respiratoires infimes qui, au bout d'une vingtaine de secondes, se sont légèrement accentués. A la rupture du courant, mouvements respiratoires extrêmement énergiques qui se sont calmés peu à peu pour revenir à la normale. Du côté du cœur, nous voyons, à la fermeture du courant, une augmentation brusque de la pression, variable pendant la durée du passage, mais le cœur continue à battre régulièrement, avec une certaine accélération toutefois.

» A la rupture du courant, chute brusque de la pression, le cœur continue à battre. Tout rentre graduellement dans l'ordre au bout de quelques minutes.

» *Deuxième tracé (Pl. IV, chien 3)* pris sur un chien de 18 kg chloralosé, les électrodes étant placées comme dans le cas précédent.

» La tension fut élevée à 100 volts et le courant passa pendant 24 secondes avec une intensité de 116 milliampères.

» Du côté du cœur, nous voyons, dès le passage du courant, une hausse de la pression en même temps que tous les muscles du corps se sont contractés. Mais au bout de quelques secondes (5 à 6), la pression sanguine tombe rapidement pour ne plus se relever: on ne voit plus trace de battements du cœur.

» D'un autre côté, les mouvements respiratoires qui se sont

arrêtés pendant le passage du courant reprennent à la rupture, mais vont en s'affaiblissant et en se raréfiant jusqu'à cessation complète. C'est la respiration agonique après arrêt du cœur.

» Si, aussitôt après cessation du courant, on pique dans le cœur à travers la paroi thoracique, une aiguille à tricoter pointue, munie à son extrémité libre d'un petit drapeau en papier, on voit ce petit drapeau agité d'un frémissement caractéristique de mouvements de trémulations fibrillaires rapides des ventricules, mouvements n'ayant aucune relation avec les systoles normales et ne possédant aucune efficacité pour lancer le sang dans la circulation. L'arrêt du cœur avec trémulations fibrillaires est considéré comme fatalement mortel chez le chien.

» *Troisième tracé (Pl. VI, chien 5)* pris sur un chien chloralosé de 14 kg dans les mêmes conditions, mais avec une tension de 1140 volts. Le courant passa pendant 18 secondes; aussitôt qu'il fut lancé, hausse de la pression avec chute consécutive rapide due à l'arrêt du cœur en trémulations fibrillaires. Arrêt de la respiration pendant le passage du courant suivi à la rupture de quelques respirations agoniques.

» L'intensité était montée à 2 ampère.

» *Quatrième tracé (Pl. VI, chien 6).* — Chien de 30 kg chloralosé. Tension 2250 volts, courant 4,6 ampères. Le courant a passé pendant 3 secondes et cela a suffi pour arrêter le cœur en trémulations fibrillaires et consécutivement la respiration comme dans le cas précédent.

» *Cinquième tracé (Pl. VII, chien 7).* — Chienne de 10 kg, chloralosée. Tension 4600 volts.

» L'intensité du courant s'est élevée à 7 ampères. Aux points d'attache des électrodes, il se produisit rapidement des escharres énormes, mettant l'os à nu, et cependant, malgré plusieurs passages du courant, jusqu'à quatre, ni le cœur, ni la respiration ne s'arrêtèrent. Mais aussitôt qu'on fit tomber la tension, en revenant à 110 volts (*Pl. VIII*), les phénomènes habituels se produisirent, arrêt du cœur en trémulations fibrillaires, puis, consécutivement, arrêt de la respiration.

» Messieurs, voici un *sixième tracé* (Pl. IX, chien 9), qui ne vous étonnera nullement, mais que je tiens néanmoins à vous montrer. Il est pris dans les mêmes conditions que les précédents sur un chien de 11 kg, avec une tension de 4500 volts, mais nous avons intercalé dans le circuit du chien une résistance sans self-induction de 99 000 ohms. Le courant était réduit à 45 milliampères. On obtint des résultats analogues à ceux du premier tracé que je vous ai montré, arrêt passager de la respiration, hausse momentanée de la pression sanguine, tout rentrant dans l'ordre après cessation du courant. Il a suffi de réduire la résistance additionnelle de moitié pour voir aussitôt le cœur s'arrêter en trémulations fibrillaires.

» Ce n'est pas la tension, c'est uniquement l'intensité qui détermine les effets dangereux du courant; ce fait, évident *a priori*, a une grande conséquence pratique, comme nous le verrons plus loin.

» Au point de vue expérimental, il nous a permis de stabiliser notre courant et de le rendre indépendant des variations de résistance du chien, en utilisant de hautes tensions et en intercalant dans le circuit des résistances additionnelles convenables.

» Je vous ai montré ces quelques tracés à titre d'exemples. Il résulte, des nombreuses déterminations que nous avons faites autour de ce que j'appellerai la valeur critique du courant, que le courant alternatif industriel fait courir à un chien les plus grands dangers, quand le courant passe d'une patte antérieure à une autre patte quelconque, c'est-à-dire lorsque le cœur est sur un trajet, et quand l'intensité efficace monte aux environs de 70 à 80 milliampères environ. Il y a alors rapidement un arrêt du cœur en trémulations fibrillaires, 4 à 5 secondes suffisent pour cela. A mesure que l'intensité s'élève, la mort se produit de plus en plus rapidement, mais il faut toujours au moins 1 à 2 secondes d'action. Au-dessus d'une certaine valeur, qui dépasse 5 à 6 ampères, le cœur ne s'arrête plus, mais il se produit des brûlures terribles aux points d'attache des électrodes.

» Nous avons repris ces expériences sur des chiens non chloralosés. Dans ces conditions, on ne faisait ni tracé de la pression, ni tracé de la respiration, ce qui exige une préparation préalable

douloureuse pour l'animal, mais on observait ce qui se passait. Or, il y eut concordance absolue avec ce que nous avaient donné les expériences accompagnées de tracés. Le chien meurt dans les mêmes conditions, avec les mêmes intensités de courant, et l'on peut, aussitôt après l'électrocution, constater, au moyen d'un drapeau, l'existence des trémulations fibrillaires. Il n'y a aucune différence entre le chien chloralosé ou non chloralosé.

» Il ne faudrait pas croire toutefois qu'un courant alternatif d'intensité efficace inférieure à 70 ou 80 milliampères soit complètement inoffensif : nous avons tué des chiens avec 45 et même 35 milliampères, peut-être pourrait-on même descendre plus bas ; mais, dans ces conditions, il n'y a plus arrêt du cœur en trémulations fibrillaires et le mécanisme de la mort est complètement différent. Sous l'influence du courant, tous les muscles du corps sont tétanisés, les combustions intra-organiques s'élèvent énormément et l'animal a un besoin impérieux d'absorber de l'oxygène et d'exhaler de l'acide carbonique. Or, sa respiration est considérablement entravée par la tétanisation des muscles du thorax, et on le voit asphyxier peu à peu ; il met, à mourir, un temps assez long, jusqu'à 10 minutes. Si, avant qu'il soit mort, on le détache, il revient à la vie. Ceci est évidemment très important au point de vue pratique. Un sujet, victime de ce genre d'accident, peut être sauvé au bout de plusieurs minutes ; traversé au contraire par un courant de 80, 100 milliampères, etc., il est perdu en quelques secondes.

» Voici maintenant un tracé du plus haut intérêt (*Pl. XX, chien 22*).

» Un chien de 24 kg ayant été chloralosé et préparé pour prendre les tracés de la pression artérielle et de la respiration, on fixa une électrode sous le menton et une autre sur le sommet du crâne. Dans ces conditions, le cœur n'était pas sur le trajet du courant, qui traversait par contre le cerveau et le bulbe. La tension appliquée fut de 1080 volts sans résistance intercalaire. L'intensité monta à 400 milliampères ; nous étions dans une zone d'extrême danger, en nous reportant aux tracés précédents ; les durées de passage furent de 35 et de 58 secondes.

» Or, vous constatez sur le tracé que, si au moment où on lance le courant, et pendant toute la durée du passage, la respiration

s'arrête complètement, il n'en est pas de même du cœur. Certes il est troublé dans son fonctionnement, il se produit des oscillations de pression énormes, après arrêt du courant, oscillations que, du reste, un nouveau passage du courant calme, mais le cœur ne s'arrête pas et la respiration reprend à l'arrêt du courant. Mais il suffit de détacher un des fils, par exemple celui qui va au sommet du crâne, et de le fixer à une patte postérieure, pour qu'au premier passage du courant le chien soit immédiatement tué, avec arrêt du cœur en trémulations fibrillaires (*Pl. XXI*). Vous voyez donc nettement que le courant mortel pour le cœur ne l'est pas pour les centres nerveux.

» Et ceci, on peut également le répéter sur le chien non préparé, moyennant quelques précautions par exemple, car, après le passage du courant, le chien est comme fou et inabordable. Il faut, au préalable, le mettre à la chaîne. Des courants bien plus intenses, produisant de fortes escharres sur la tête et sous le menton se comportent de même. Néanmoins, il y a une limite, et de très fortes intensités produisent une inhibition telle des centres nerveux, que la respiration s'arrête définitivement, puis, consécutivement, le cœur cesse de battre.

» Quelles conclusions pouvons-nous tirer de là au point de vue du but que nous nous proposons d'atteindre ? Avons-nous le droit d'étendre à l'homme ce que nous avons observé chez le chien ? La seule manière que nous ayons de nous en assurer est de relever les conditions dans lesquelles se sont produits des accidents bien observés et de voir s'il y a concordance avec les conclusions de nos expériences, qui, en tout cas, peuvent nous servir de guide dans nos raisonnements.

» Considérons d'abord une distribution à 110 volts. La résistance du corps humain est chose éminemment variable, nous le savons. Elle dépend essentiellement de la façon dont on prend le contact et de l'état de la peau. On ne peut, dans ces conditions, indiquer aucun chiffre même approximatif, puisque les résultats de mesures varient d'un peu plus de 1000 ohms à plusieurs centaines de mille.

» Mais, si l'on prend un très bon contact (et on ne l'obtient qu'en plongeant les mains dans deux vases contenant de l'eau auxquels on amène le courant), on a des nombres variant suivant diverses conditions entre 1200 et 1500 ohms. Il y a peu de chiffres

sortant de ces limites, et dans ces cas, ils s'en écartent fort peu. Or, avec 110 volts, une résistance de 1200 ohms donnera 90 milliampères; 1500 ohms donneront 70 milliampères. On le voit, on se trouve dans une zone de 70 à 90 milliampères, déjà très dangereuse pour le chien. L'est-elle également pour l'homme?

» Nous ne manquons plus, malheureusement, d'éléments de contrôle, c'est-à-dire de cas d'électrocution avec 110 volts. Une cuisinière à Genève, ayant les mains mouillées, prend d'une main une lampe électrique, de l'autre elle veut tirer de l'eau à la conduite. A peine a-t-elle saisi le robinet, qu'elle est prise et électrocutée. Sans doute, les fils amenant le courant avaient un défaut d'isolement, l'un d'eux était à la canalisation d'eau, l'autre au support de la lampe.

» Nous voyons aussi une personne, se trouvant dans une baignoire et voulant déplacer une lampe portative à 110 volts, être prise et électrocutée, sans doute encore par un isolement défectueux des fils. Puis il y a un ouvrier grattant intérieurement une chaudière à vapeur à la paroi de laquelle il était appuyé par le dos humide de transpiration, et voulant déplacer la lampe qui l'éclairait. Il est pris et électrocuté.

» Il ne faudrait pas en conclure et me faire dire que le courant à 110 volts présente pratiquement un grand danger, cela serait loin de ma pensée. Il m'est arrivé souvent, et il nous est arrivé à tous, d'arranger un mauvais contact dans une prise de courant, sans avoir ouvert l'interrupteur général de la distribution, et je continuerai à le faire pour ma part, parce que je ne puis dans ces conditions prendre qu'un contact médiocre avec la distribution, et que je sais ne risquer absolument rien. Mais il faut savoir qu'un courant à 110 volts devient dangereux si l'on réalise un contact parfait avec les mains mouillées et de larges surfaces. Ceci peut se rencontrer comme le démontrent les faits que je vous ai cités, chaque fois qu'on travaille dans des locaux mouillés : certaines industries ou certains chantiers peuvent ainsi devenir le lieu d'accidents à une aussi basse tension que celle d'une distribution de lumière à 110 volts.

» Dans ces accidents, il y a certainement arrêt du cœur avec trémulations fibrillaires.

» Si la mort résulte d'un contact avec un conducteur à tension plus élevée, les difficultés d'interprétation peuvent être très grandes, puisque la manière dont la mort s'est produite va dépendre du trajet suivi par le courant à travers le corps et de la qualité du contact.

» Il faut faire une analyse très exacte de ce qui s'est passé, être complètement renseigné sur toutes les conditions de l'accident. J'ai à peine besoin de dire combien cela est rare. C'est pourquoi la Commission, à la fin de ses travaux, a émis le vœu qu'il soit institué une Commission permanente chargée de faire une enquête sérieuse sur les accidents électriques qui se produiront dorénavant.

» J'ajouterai que ce qui complique encore les choses, c'est que les expériences sur le chien, en admettant, ce que je crois, qu'elles puissent nous renseigner sur ce qui se passe chez l'homme, ne peuvent le faire que pour l'homme sain. Que se passera-t-il chez l'homme ne jouissant pas de la plénitude de sa santé; en particulier chez certains cardiaques? il est impossible de le prévoir actuellement, et, au point de vue des accidents du travail, il y a là un grave point d'interrogation.

» Je n'ai envisagé jusqu'ici que le courant alternatif à 42 périodes. Nous avons reconnu qu'en restant dans les limites de fréquence industrielle, c'est-à-dire entre 11 et 75 périodes par seconde, on n'observait pas de différence appréciable dans les résultats obtenus.

» Je passerai maintenant au courant continu. Au point de vue de l'électrocution proprement dite, on obtient absolument les mêmes effets que pour le courant alternatif, mais il faut un courant environ quatre fois plus intense pour tuer un animal avec le courant continu qu'avec le courant alternatif.

» Voici un tracé (*Pl. XXIV*, chien 40) pris sur un chien de 16 kg, les électrodes étant fixées à la patte antérieure gauche et postérieure droite. La tension est de 210 volts et l'intensité est montée à 750 milliampères. On voit que, aussitôt le courant fermé, le cœur cesse de battre, il en est de même pour la respiration; mais celle-ci se rétablit à la rupture du circuit pour s'éteindre peu à peu par suite de l'arrêt du cœur en trémulations fibrillaires. Tout se passe donc comme pour un courant alternatif mortel.

» Sur cet autre tracé (*Pl. XXVII*, chien 43), on a fait une série de passages du courant de 10 secondes chacun en élevant peu à peu la tension. Pour 207 milliampères, le chien n'est pas mort, le tracé ressemble à celui qu'on aurait obtenu avec un courant alternatif au-dessous de 70 milliampères. Il en est de même pour 258 milliampères. Mais, pour 339 milliampères, le cœur s'arrête en trémulations fibrillaires et la respiration cesse progressivement; nous sommes au-dessus du point critique. Comme nous avons fixé à 70 ou 80 milliampères le courant alternatif mortel, on voit que le courant continu mortel est bien environ quatre fois plus intense.

» Mais, si le courant continu est, au point de vue de l'électrocution proprement dite, moins à craindre que le courant alternatif, il peut néanmoins donner lieu à certains accidents très particuliers, extrêmement graves pour l'avenir de la victime.

» On sait que, dans l'électrolyse commune, lors du passage du courant dans une solution saline par exemple, les produits mis en liberté n'apparaissent que sur les électrodes. Tout l'espace interpolaire ne paraît être le siège d'aucun changement. Cela est vrai pour un milieu homogène, il n'en est plus de même pour un milieu hétérogène.

» En particulier, si l'on fait passer un courant continu à travers un tissu animal, un muscle par exemple, on constate sur tout le trajet du courant des altérations qu'on n'observe jamais avec le courant alternatif et qu'on peut mettre en évidence, soit par les modifications des propriétés fonctionnelles du muscle soit par l'examen histologique.

» Tout courant redressé se comporte, bien entendu, à ce point de vue comme un courant continu. Ce sont là des faits que j'ai établis il y a plus de 20 ans.

» Je ne citerai que l'expérience suivante, particulièrement démonstrative à cet égard :

» G représente une grenouille dont la patte gauche A est reliée à l'armature interne d'un condensateur dont l'armature externe est à la terre. MN est un petit levier métallique oscillant autour de O par un mouvement de sonnerie non figuré sur le dessin; *a*, *b*, *c*, *d* figurent de petites coupes à mercure dans lesquelles peuvent prendre contact des aiguilles en platine fixées au levier oscillant.

P est une pile dont le pôle — est à terre, le pôle + relié à *d*. On voit les autres liaisons sur la figure 1.

» Quand MN oscille vers la droite, le contact se fait en *c* et *d*

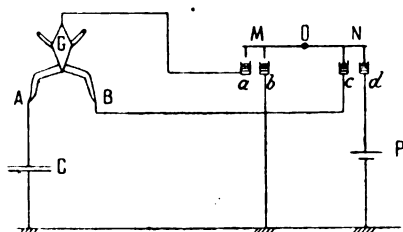


Fig. 1.

et se rompt en *a*, *b*; le condensateur *C* se charge par un courant ascendant en *B*, descendant en *A*. Au moment où le levier revient vers la gauche, le contact se rompt en *c*, *d* et se rétablit en *a*, *b*; la décharge du condensateur se fait par *A* seulement dans le sens ascendant.

» On laisse osciller le levier *MN*, pendant un certain temps; finalement *B* n'a été traversé que par des décharges ascendantes et *A* par des décharges alternatives. Si l'expérience a été assez prolongée, on constate que ni l'un, ni l'autre des muscles *A* et *B* ne répond plus à l'excitation, tous deux paraissent également fatigués. Mais alors que le muscle *A*, qui cependant a reçu un nombre d'excitations double de celui qu'a reçu *B*, se sépare complètement, comme on peut s'en assurer par une expérience myographique, la contractilité de *B*, ne se rétablit pas.

» J'ai montré d'ailleurs que, dans ce cas, *B* est le siège d'une polarisation qui ne se retrouve pas chez *A*. De plus, si l'on place la grenouille dans un aquarium, rapidement elle se sert normalement de sa patte gauche, tandis qu'elle laisse de plus en plus traîner la patte droite, qui devient le siège d'une atrophie musculaire progressive. Qu'on me passe cette expression, que j'emploie à dessin pour faire prévoir la gravité de la chose chez l'homme: la grenouille a, de ce côté, une incapacité de travail permanente.

» Ceci se retrouve absolument, et avec la précision d'une expérience de laboratoire, dans certains accidents industriels. Je rap-

pellerai une observation absolument typique à cet égard. Un homme du service de M. le professeur Terrier avait été victime de brûlures électriques aux mains, le courant ayant passé d'une main à l'autre. Ces brûlures n'avaient pas un caractère d'extrême gravité et guérirent très bien. Mais, fait qui ne se reproduisait chez aucun des autres malades, quelquefois plus gravement atteints, et soignés dans le même service, le sujet, quoique guéri en apparence, se plaignait d'une faiblesse étrange dans les bras. On eut beau le soumettre à un traitement électrique, rien n'y faisait, la faiblesse, la paralysie allaient en croissant, un commencement d'atrophie se faisait sentir. On attribua ces phénomènes à une action réflexe, mais, aussitôt que je lus l'observation, je songai à mes expériences et à l'électrolyse interpolaire. Et effectivement le malade avait été frappé par le courant continu. Il fut suivi fort longtemps et son atrophie, que rien ne put enrayer, alla sans cesse en croissant, entraînant une incapacité complète de travail.

» J'ai trouvé, depuis, plusieurs observations analogues. On voit combien ces faits sont importants au point de vue des accidents du travail. Un sujet est frappé par un courant alternatif, il a quelques brûlures; une fois guéri il est indemne, il n'y a plus rien à craindre pour l'avenir. Mais, dans le cas d'un accident dû au courant continu, il faut être plus circonspect et plus réservé sur les suites de l'accident. On ne peut pas dire, comme on le fait trop souvent, que le courant alternatif est sans danger, qu'il est inoffensif.

» J'arrive maintenant aux conclusions pratiques formulées par la Commission. Ces conclusions se présentent en somme sous la forme de trois affiches, deux d'entre elles sont destinées à renseigner les sauveteurs sur les précautions à prendre pour ne pas courir à un accident nouveau; la troisième est d'ordre pédagogique.

» Avant tout, un point sur lequel nous avons été immédiatement d'accord, c'est qu'il fallait des instructions différentes pour les professionnels et pour le grand public. On ne peut donner à un ignorant les mêmes conseils qu'à un homme expérimenté.

» Cette considération nous a même obligés à ne pas adopter la même classification des courants dans les deux cas.

» La première affiche est destinée à être apposée exclusivement à l'intérieur des usines et dans leurs dépendances. Les conseils qu'elle

renferme s'adressent aux professionnels. Tous les termes en ont été longuement pesés et discutés, mais je ne puis naturellement exposer ici les raisons pour lesquelles telle formule a été adoptée de préférence à telle autre. L'affiche commence par des conseils généraux à observer dans tous les cas.

» **Soustraire le plus rapidement possible la victime aux effets du courant.**

» **L'humidité rend le sauvetage particulièrement dangereux.**

» Je n'insiste pas sur ces recommandations dont la nécessité s'impose.

» J'arrive à la classification du courant. En réalité cette classification devrait être basée sur l'intensité : cela est impossible pratiquement, l'intensité dépendant des conditions dans lesquelles se produit l'accident ; il a fallu se résoudre à prendre la tension.

» *Première catégorie.* — Courants alternatifs de moins de 150 volts ou continus de moins de 600 volts.

» Pour faire une assimilation entre les courants continus et alternatifs, nous avons admis, comme semblent le démontrer les expériences, que, pour exposer aux mêmes risques, les courants continus devaient avoir une intensité environ quatre fois plus grande que les courants alternatifs.

» Nous avons adopté cette première catégorie limitée à 150 volts alternatifs, parce que les courants qui peuvent traverser le corps humain sous de semblables tensions, ne prennent d'intensité dangereuse que dans les cas exceptionnels de contact parfait, et que, pour le sauveteur, il est aisé d'obtenir un isolement suffisant pour éviter cette intensité. Il suffit, ainsi que le prescrivent nos recommandations, de ne pas se mettre directement en bon contact avec le conducteur.

» *Deuxième catégorie.* — Courants de tension supérieure aux précédentes.

» Il a fallu faire une subdivision.

» Nous avons établi une première limite de tensions alternatives à 6000 volts entre conducteurs.

» Pourquoi 6000 volts ? Cela tient à ce que, au-dessous de cette valeur, le sauvetage peut encore se faire sans danger, moyennant

de bonnes précautions. De plus, c'est au-dessus de 6000 volts que se trouve une lacune dans les tensions pratiquement employés. Si l'on avait pris 5000 volts par exemple, on aurait laissé quelques tensions de 5500 volts, qu'on rencontre dans la pratique, hors de cette catégorie pour les grouper avec des tensions beaucoup plus élevées. Cela n'était pas judicieux, car, en somme, les mêmes recommandations s'appliquent aux tensions de 5000 et de 5500 volts, tandis qu'il n'en est pas de même pour celles de 5500 et de 20000 par exemple. En établissant la limite à 5000 volts, dans beaucoup de cas, il aurait pu y avoir doute pour savoir si l'on se trouvait en deçà ou au delà de cette limite, il en serait résulté de graves difficultés au point de vue des accidents du travail et des expertises médico-légales. En fixant, au contraire, la limite à 6000 volts, comme pratiquement il n'y a pas de courants au voisinage immédiat de ces 6000 volts, il ne peut y avoir de malentendu.

» Au point de vue des précautions à prendre, on se met à l'abri de tout accident en s'isolant du côté de la victime ou du conducteur comme il est prescrit dans l'affiche, ou bien en s'isolant du côté de la terre sur un tabouret de fortune, que nous avons étudié et dont nous indiquons l'installation. Pour plus de sécurité il vaut mieux employer les deux procédés d'isolement simultanément.

» Si un accident se produit avec la dernière catégorie de tensions, c'est-à-dire **au-dessus de 6000 volts, le sauvetage est toujours très dangereux**, il faut s'isoler avec grand soin du côté de la victime et du côté du sol, la moindre négligence peut provoquer une catastrophe. L'affiche se termine par l'indication des soins à donner à la victime, et par cette recommandation.

« Appeler le plus rapidement possible un médecin ».

» La deuxième affiche s'adresse au public; elle doit être apposée à l'extérieur des usines, à la porte des mairies, à l'intérieur des écoles et dans le voisinage des lignes à haute tension.

» Elle commence par les mêmes recommandations générales que la première.

» Ici nous n'avons pu adopter la même division des tensions que dans la première affiche. Le public ne sait en effet qu'exception-

nellement quelle est la tension d'une ligne. Dès lors voici comment nous avons procédé.

» *Premier cas.* — L'accident se produit par contact avec les fils, fusibles, interrupteurs ou lampes d'une installation particulière domestique. Nous avons, à coup sûr, affaire à un courant à basse tension. Les précautions les plus élémentaires permettent au sauveteur d'intervenir sans danger. Il suffit qu'il ne touche pas directement les conducteurs; qu'il s'enveloppe, par exemple, les mains de linges secs, ou monte sur un siège en bois, une chaise par exemple. Toutefois, il ne doit pas oublier d'opérer avec une main seulement, pour ne pas risquer de se mettre en dérivation entre les deux conducteurs.

» *Deuxième cas.* — L'accident s'est produit par contact avec une distribution quelconque. Le public ne doit pas intervenir, il faut l'écarter du lieu de l'accident et faire couper le courant. Toute autre recommandation serait dangereuse.

» L'affiche se termine par les mêmes conseils que la précédente pour les soins à donner à la victime.

» Il y a un procédé qui, au premier abord, peut paraître très sûr et très séduisant, pour effectuer un sauvetage sans danger. C'est celui qui consiste à établir un court-circuit entre les points du corps du sauveteur par lesquels il prend contact avec la victime ou avec la distribution d'électricité. Dans ce cas, le sauveteur se trouvant en dérivation sur le court-circuit de résistance bien inférieure à celle du corps humain, ne peut être parcouru que par un courant inoffensif.

» Pareille pratique est, en réalité, très aléatoire et très dangereuse. Le moindre défaut de contact dans le prétendu court-circuit lui fait perdre toute son efficacité, et le sauveteur se croyant à l'abri de tout danger est frappé. En second lieu, si les conditions du court-circuit ne sont pas bien étudiées, on risque de renforcer le courant dans toute la partie extérieure à ce court-circuit, en particulier dans la victime qu'on achève au lieu de la sauver.

» C'est ce que je me permettrai d'appeler un *procédé de laboratoire*, absolument sûr s'il est bien étudié et installé à loisir avec tout le soin nécessaire, extrêmement dangereux s'il est rapidement improvisé à l'occasion d'un accident.

» C'est pourquoi après discussion et examen sérieux nous l'avons absolument rejeté.

» Messieurs, en terminant ses travaux, la Commission a émis deux vœux :

» Premièrement, il est indispensable de faire l'éducation du public, en particulier des enfants. Nous avons prévu une petite affiche destinée aux écoles qui, sous formes d'images, montre aux enfants quels sont les risques qu'ils peuvent courir en se mettant en contact soit avec des isolateurs, soit avec des fils. Il est à désirer que de petites conférences très simples et très pratiques soient faites aux instituteurs qui les répéteront aux enfants. C'est là un des moyens les plus efficaces pour réduire le nombre des accidents se produisant dans le public.

» En second lieu, il importe que les accidents qui auront lieu dans la suite, surtout les accidents mortels, soient étudiés soigneusement, pour bien établir les conditions dans lesquels ils se sont produits. La pénurie et l'incertitude des renseignements qu'on a en général à cet égard constituent une lacune grave dans nos connaissances. Nous espérons que les pouvoirs publics voudront bien instituer une réglementation, pour que cette enquête scientifique sur les accidents se poursuive avec toutes les garanties nécessaires.

» En terminant, je tiens encore, au nom de la Commission, à remercier la Société des Électriciens pour l'aide qu'elle nous a prêté, M. Janet pour son amabilité, pendant le temps assez long où nous avons encombré une partie du Laboratoire central d'Électricité, et M. David pour son concours précieux et dévoué. »

EXPÉRIENCES SUR L'ÉLECTROCUTION EFFECTUÉES AU LABORATOIRE CENTRAL D'ÉLECTRICITÉ PAR LA COMMISSION CHARGÉE D'ÉLABORER LE TEXTE DE L'INSTRUCTION SUR LES PREMIERS SOINS À DONNER AUX VICTIMES DES ACCIDENTS ÉLECTRIQUES.

Par M. ZACON.

« A la fin de l'année 1908, M. le Ministre des Travaux publics nomma une Commission ⁽¹⁾ chargée de revoir et de modifier au besoin les prescriptions concernant les soins à donner aux personnes victimes d'accidents dus à des contacts avec des conducteurs d'énergie électrique.

» La Société internationale des Électriciens, qui porte le plus grand intérêt à cette question, décida de prendre à sa charge les frais des expériences; elle mit à la disposition de la Commission les arrérages du legs Cheux, ainsi que les locaux, le matériel et le personnel nécessaires.

(1) Cette Commission est composée comme suit :

MM. WEISS (Georges), Membre de l'Académie de Médecine, Président;
le Dr LANGLOIS, Professeur agrégé à la Faculté de Médecine de Paris;
LECLERC DE PULLIGNY, Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées;
MONMERQUÉ, Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées, Secrétaire du Comité permanent d'Électricité;
WEISS (Paul), Ingénieur en chef des Mines, Membre du Comité permanent d'Électricité;
MAUREAU, Ingénieur en chef des Télégraphes, Membre du Comité permanent d'Électricité;
DEVAUX-CHARBONNEL, Ingénieur des Télégraphes, Membre du Comité permanent d'Électricité;
BRYLINSKI, Directeur de la Société le Triphasé, Membre du Comité permanent d'Électricité;
CORDIER, Directeur de la Société d'énergie électrique du Littoral méditerranéen, Membre du Comité permanent d'Électricité;
HARLÉ, de la Maison Sutter-Harlé, Membre du Comité permanent d'Électricité;
HILLAIRET, Ingénieur-Constructeur, Membre du Comité permanent d'Électricité;
JANET, Directeur du Laboratoire central d'Électricité;
BOUCHEROT, Président de la Société internationale des Électriciens;
ZACON, Inspecteur du Travail, Rapporteur.

Les expériences ont été exécutées avec le concours de M. Ch. DAVID, Chef de travaux au Laboratoire central d'Électricité.

» L'École de Médecine et l'Institut Marey prêtèrent également du personnel et divers instruments.

» Les expériences ont été effectuées, au Laboratoire central d'Électricité pendant les mois de mars, avril et mai 1909, et de mars et avril 1910.

» I. DISPOSITIONS EXPÉRIMENTALES. — Les expériences ont toutes porté sur des chiens.

» Afin de rendre ces expériences aussi comparatives que possible, on a presque toujours employé la même disposition générale des appareils, et les électrodes ont été placées soit aux pattes, soit à la tête, à part quelques exceptions.

» On a procédé de la façon suivante, sauf indications contraires : l'animal en expérience était attaché sur une table en bois isolée du sol; dans la plupart des cas, il a été immobilisé par une injection de chloralose.

» Les mouvements respiratoires étaient enregistrés au moyen d'une capsule de Marey, les déplacements du style étaient inscrits sur du papier enduit de noir de fumée placé sur un cylindre tournant. La capsule était en communication avec une tubulure à dérivation placée sur le trajet de la trachée préalablement sectionnée.

» La pression du sang était enregistrée à l'aide d'un manomètre à mercure dont l'une des branches était en communication avec une canule introduite dans l'artère fémorale de l'animal; le tube servant à relier l'artère au manomètre était en caoutchouc très épais rempli de liquide. Dans l'autre branche du manomètre se trouvait un flotteur portant un style dont les déplacements s'inscrivaient sur le cylindre tournant, en même temps que ceux du style de la capsule de Marey.

» Les durées d'application de la tension étaient enregistrées sur le cylindre par le style d'un signal de Marcel Deprez qui était mis automatiquement en circuit ou hors circuit en même temps que l'animal.

» La vitesse de rotation du cylindre correspondait, pour toutes les expériences, à une vitesse de déplacement du papier devant les styles égale à 1 mm par seconde.

» Les électrodes amenant le courant à l'animal étaient placées soit aux pattes, soit à la tête, sur le crâne et sous le menton.

» Dans le premier cas, elles étaient constituées par des feuilles de papier d'étain fortement serrées sur de l'ouate mouillée entourant le membre sur une longueur de 10 à 15 cm. Lorsque le courant était amené à la tête, les électrodes étaient constituées par un fil de cuivre d'environ 1 mm de diamètre et 10 cm de longueur introduit sous la peau.

» Le courant utilisé, pour toutes les expériences de la première série, a été du courant alternatif fourni par le Secteur de la Rive gauche dont la fréquence est d'environ 42 p : s.

» La tension était élevée ou abaissée, à partir de 110 volts efficaces, à l'aide de transformateurs. Cette tension était parfois appliquée directement à l'animal; dans d'autres cas le courant était limité à la valeur voulue à l'aide d'un rhéostat non inductif intercalé entre la source de courant et l'animal.

» Le circuit comprenait un interrupteur à mercure permettant d'établir ou d'interrompre le courant; la manœuvre de cet inter-

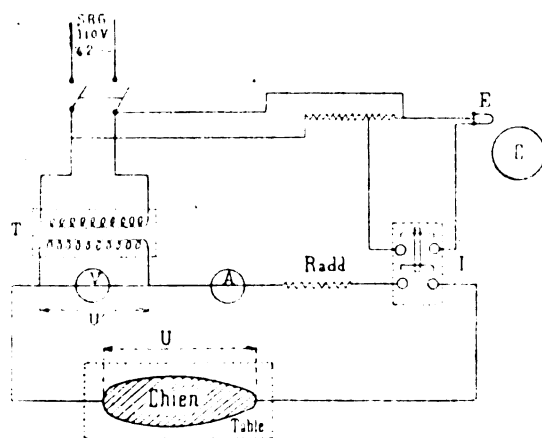


Fig. 1. — Montage des appareils électriques pour la plupart des expériences.

T, Transformateur; E, Electro-aimant inscripteur Deprez; A, Ampèremètre; V, Voltmètre; C, Cylindre tournant; Radd, Résistance additionnelle; I, Interrupteur fermant simultanément les circuits de l'animal et de l'électro-aimant inscripteur Deprez.

rupteur commandait automatiquement l'électro-aimant Deprez, inscripteur de la durée du passage du courant.

» Les valeurs de la tension et du courant étaient mesurées à

l'aide de voltmètres et d'ampèremètres électrodynamiques ou thermiques.

Par suite des chutes de tension dans les transformateurs et les conducteurs ou rhéostats, la tension pendant le passage du courant était, dans certains cas, notablement inférieure à la tension au moment de la fermeture; dans ces cas, on a indiqué les valeurs de la tension avant la fermeture du circuit et un instant avant l'ouverture.

» L'intensité du courant augmente parfois assez notablement (10 pour 100 environ) pendant la durée de l'application de la tension; en général, la valeur indiquée pour cette intensité est celle relevée au moment où l'on allait couper le courant; dans certains cas, on a aussi indiqué la valeur de l'intensité au début du passage du courant.

» La figure 1 donne le diagramme du montage des expériences

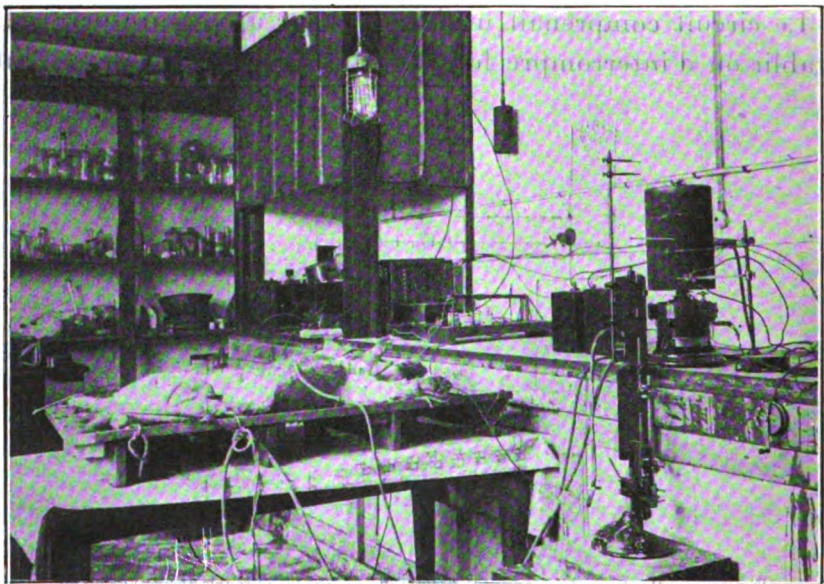


Fig. 2.

dans la majorité des cas. La figure 2 donne une vue générale de la disposition du sujet et des appareils dans l'une des expériences.

1. CHIEN PESANT 21,7 kg. *Chloralose*.

» *Électrodes* : patte antérieure droite et patte postérieure gauche.

» *Première application de la tension (Pl. I)* :

<i>U</i>	42 volts.
<i>I</i>	0,042 ampère.
<i>T</i>	50 secondes.
<i>R_{add}</i>	0,0 ohm.
<i>R_{app}</i>	1000 ohm.
<i>UI</i>	1,76 volt-ampère.
<i>UIT</i>	88 joules.

» *Cœur* : les tracés montrent que l'application de la tension provoque d'abord une brusque augmentation de la pression sanguine; les battements du cœur continuent, mais sont plus rapides; la pression tombe presque brusquement au moment de l'ouverture du circuit, décroît encore pendant 5 à 10 secondes après, puis les battements se rétablissent peu à peu normalement.

» *Respiration* : respiration saccadée et très faible pendant 15 secondes, puis haletante et plus profonde jusqu'au moment de l'ouverture du circuit; elle se rétablit ensuite progressivement.

» *Deuxième application de la tension* (quelques minutes plus tard), (Pl. II) :

<i>U</i>	42 v.
<i>I</i>	0,047 a.
<i>T</i>	68 s.
<i>R_{add}</i>	0,0 ohm.
<i>R_{app}</i>	894 ohms.
<i>UI</i>	1,97 va.
<i>UIT</i>	134 j.

» *Cœur* : la pression sanguine n'a pas été enregistrée, la canule placée dans l'artère ayant été obturée par un caillot.

» *Respiration* : le tracé est analogue à celui obtenu précédemment; l'animal se rétablit.

» *Troisième application de la tension* (4 à 5 minutes plus tard) (Pl. II) :

<i>U</i>	42 v.
<i>I</i>	0,047 a.
<i>T</i>	46 s.
<i>R_{add}</i>	0,0 ohm.
<i>R_{app}</i>	894 ohms.
<i>UI</i>	1,97 va.
<i>UIT</i>	90 j.

» Mêmes phénomènes que précédemment.

» *Quatrième application de la tension* (quelques minutes plus tard) (Pl. II) :

<i>U</i>	100 v.
<i>I</i>	0,145 a.
<i>T</i>	35 s.
<i>R_{add}</i>	0,0 ohm.
<i>R_{app}</i>	690 ohms.
<i>UI</i>	14,5 va.
<i>UIT</i>	507 j.

» *Cœur* (pas d'inscription) : le cœur continue à battre.

» *Respiration* : arrêt des mouvements respiratoires.

» *Cinquième application de la tension* (53 secondes plus tard) (Pl. II) :

<i>U</i>	100 v.
<i>I</i>	non mesurée.
<i>T</i>	12 s.
<i>R_{add}</i>	0,0 ohms.

» *Cœur* : arrêt des battements.

» *Respiration* : mouvements déjà arrêtés depuis l'application précédente.

2. CHIEN PESANT 13 kg. *Chloralosé*.

» *Électrodes* : pattes antérieure et postérieure droites.

» *Première application de la tension* (Pl. III) :

<i>U</i>	58 v.
<i>I</i>	0,035 a.
<i>T</i>	32 s.
<i>R_{add}</i>	0,0 ohm.
<i>R_{app}</i>	1656 ohms.
<i>UI</i>	2,03 va.
<i>UIT</i>	63 j.

» *Cœur* : brusque augmentation de la pression qui atteint son maximum 10 secondes environ après la fermeture du circuit, puis décroissance progressive jusqu'au moment de l'ouverture; la pression tombe alors à une valeur inférieure à celle qu'elle avait avant l'application de la tension, le minimum se produisant 12 secondes environ après l'ouverture du circuit; la pression reprend peu à peu sa valeur primitive. Le cœur n'a pas cessé de battre, sans accélération importante, pendant la durée du passage du courant.

» *Respiration* : la respiration est saccadée et profonde pendant la durée de la fermeture du circuit; les mouvements se rétablissent ensuite progressivement, mais avec un rythme plus lent.

» *Deuxième application de la tension* (100 secondes plus tard) (Pl. III) :

<i>U</i>	58 v.
<i>I</i>	0,038 a.
<i>T</i>	60 s.
<i>R_{add}</i>	0,0 ohm.
<i>R_{app}</i>	1526 ohms.
<i>UI</i>	2,2 va.
<i>UIT</i>	132 j.

» *Cœur* : les phénomènes constatés précédemment se reproduisent à peu près identiquement; l'amplitude des variations de la pression sanguine est un peu plus grande au bout d'une trentaine de secondes après l'application de la tension.

» *Respiration* : respiration saccadée pendant une quinzaine de secondes, puis arrêt presque complet. Les mouvements respiratoires se rétablissent progressivement, après l'ouverture du circuit.

Troisième application de la tension (Pl. IV) :

<i>U</i>	103 v.
<i>I</i> ⁽¹⁾	0,068 a.
<i>T</i>	3 s.
<i>R_{add}</i>	0,0 ohm.
<i>R_{app}</i>	1515 ohms.
<i>UI</i>	7 va.
<i>UIT</i>	21 j.

» *Cœur* : brusque augmentation de la pression et arrêt immédiat du cœur.

» *Respiration* : respiration saccadée continuant une vingtaine de secondes après l'ouverture du circuit, puis arrêt.

» *Autopsie* : le cœur est animé de trémulations fibrillaires. Le massage du cœur et la respiration artificielle ont été essayés sans résultat.

(¹) L'intensité du courant n'avait pu être mesurée exactement à cause de la faible durée de la fermeture du circuit; la tension a été appliquée à nouveau pendant 15 secondes environ, 1 minute 30 secondes après la mort, et c'est l'intensité du courant relevée à ce moment qui a été indiquée.

3. CHIEN PESANT 18,3 kg. *Chloralosé.*

» *Électrodes* : pattes antérieure et postérieure droites (*Pl. IV*).

<i>U</i>	100 v.
<i>I</i>	0,116 a.
<i>T</i>	24 s.
<i>R_{add}</i>	0,0 ohm.
<i>R_{app}</i>	862 ohms.
<i>UI</i>	11.6 va.
<i>UIT</i>	278 j.

» *Cœur* : brusque augmentation de la pression sanguine qui atteint son maximum environ 3 secondes après la fermeture du courant; la pression a décréu ensuite, d'abord très rapidement, puis plus lentement jusqu'au moment où l'on a coupé le courant. Arrêt des mouvements du cœur.

» *Respiration* : les mouvements respiratoires ont été très anormaux pendant le passage du courant, ils ont commencé à devenir plus réguliers une dizaine de secondes après l'ouverture du circuit et ont persisté pendant 35 secondes environ; il y a eu ensuite quelques souffles agoniques.

» Une deuxième application de la tension a été faite, pendant 18 secondes, environ 5 minutes plus tard; elle a provoqué comme d'ordinaire un état tétanique accompagné d'une brusque augmentation de la pression sanguine et quelques mouvements respiratoires.

4. CHIEN PESANT 23 kg. *Chloralosé.*

» *Électrodes* : pattes antérieure et postérieure droites (*Pl. V*).

<i>U</i>	380 v.
<i>I</i>	0.600 a.
<i>T</i>	12 s.
<i>R_{add}</i>	0,0 ohm.
<i>R_{app}</i>	633 ohms.
<i>UI</i>	228 va.
<i>UIT</i>	2730 j.

» *Cœur* : brusque augmentation de la pression sanguine, à la fermeture du courant; diminution progressive, pendant la durée de la fermeture; puis, chute brusque au moment de l'ouverture, lorsque cesse la contraction musculaire.

» *Respiration* : les mouvements respiratoires sont arrêtés pendant le passage du courant; ils se rétablissent ensuite très longs et très amples pendant 70 secondes environ, s'arrêtent pendant 30 secondes; puis, reprennent pendant une minute environ avant de s'arrêter définitivement.

5. CHIEN PESANT 14 kg. *Chloralosé.*

» *Électrodes* : pattes antérieure et postérieure droites (*Pl. VI*).

<i>U</i>	1140 à 1080 v.
<i>I</i>	1,5 à 2 a.
<i>T</i>	18 s.
<i>R_{add}</i>	0,0,0 ohm.
<i>R_{app}</i>	760 à 510 ohms.
<i>UI</i>	1710 à 2160 va.
<i>UIT</i> (environ)	38900 j.

» *Cœur* : brusque augmentation de la pression sous l'influence des contractions musculaires; arrêt du cœur, dès la fermeture du courant.

» *Respiration* : arrêt immédiat de la respiration.

» *Autopsie* : contraction des oreillettes; mouvements fibrillaires des ventricules arrêtés en diastole. Mêmes constatations 7 minutes après l'ouverture du thorax. Le massage du cœur et la respiration artificielle ne donnent pas de résultat. Pas de traces de brûlures aux électrodes.

6. CHIEN PESANT 30 kg. *Chloralosé.*

» *Électrodes* : pattes antérieure et postérieure droites (*Pl. VI*).

<i>U</i>	2250 à 1730 v.
<i>I</i>	4,6 a.
<i>T</i>	3 s.
<i>R_{add}</i>	0,0 ohm.
<i>R_{app}</i>	376 ohms.
<i>UI</i>	7960 va.
<i>UIT</i>	23900 j.

» *Cœur* : arrêt immédiat; augmentation relativement peu importante de la pression sanguine, au moment de la fermeture.

» *Respiration* : les mouvements respiratoires ont été arrêtés pendant 13 secondes environ, après l'ouverture du circuit, sauf une seule inspiration: les mouvements ont repris ensuite, très rapides; ils ont duré 58 secondes, puis se sont arrêtés définitivement.

» Quelques instants plus tard, la tension a été appliquée à nouveau deux fois pendant quelques secondes; l'intensité du courant a dépassé 5 ampères. A chaque fermeture du circuit, on a constaté quelques mouvements respiratoires.

» La respiration artificielle a été essayée sans résultat.

7. CHIENNE PESANT 10,8 kg. *Chloralosée*.

» *Électrodes* : pattes antérieure et postérieure gauches.

» *Première application de la tension* (Pl. VII) :

<i>U</i>	4600 à 3800 v.
<i>I</i>	n'a pas été mesurée.
<i>T</i>	0,2 s.
<i>R_{add}</i>	0,0 ohms.

» Le courant a été coupé par la fusion d'un coupe-circuit.

» *Cœur* : les mouvements se sont arrêtés pendant 11 secondes environ, puis il y a eu augmentation progressive de la pression sanguine avec battements très faibles pendant 10 à 15 secondes; la pression a ensuite diminué peu à peu et est tombée, en 30 secondes, environ à une valeur inférieure à celle relevée avant la fermeture du circuit. Le cœur s'est remis ensuite progressivement.

» *Respiration* : après une inspiration profonde au moment de la fermeture du circuit, il y a eu arrêt de la respiration pendant 4 secondes environ; puis les mouvements ont repris très rapides pendant une trentaine de secondes et se sont régularisés peu à peu en 3 minutes environ.

» De la fumée ayant une odeur de chair brûlée se dégage des électrodes.

» *Deuxième application de la tension* (quelques minutes plus tard) : mêmes conditions que précédemment. Pas d'inscription sur le cylindre. Il n'y a pas apparemment d'arrêt des mouvements du cœur et du poumon. L'animal se rétablit.

» *Troisième application de la tension (Pl. VII) :*

<i>U</i>	4600 à 2700 v.
<i>I</i>	7 a.
<i>T</i>	3 s.
<i>R_{add}</i>	0.0 ohm.
<i>R_{app}</i>	386 ohms.
<i>UI</i>	18900 va.
<i>UIT</i>	56700 j.

» *Cœur* : pas d'inscription sur le cylindre, la canule étant obturée par un caillot; le cœur ne semble pas avoir été arrêté.

» *Respiration* : la respiration est suspendue pendant 6 secondes environ, après l'ouverture du circuit; après quelques mouvements saccadés, la respiration se rétablit progressivement.

» *Quatrième application de la tension* (2 minutes plus tard) : mêmes conditions que précédemment (*Pl. VIII*).

» *Cœur* : pas d'inscription; une aiguille piquée dans le cœur indique qu'il y a d'abord une accélération très grande des mouvements, qui se rétablissent ensuite peu à peu.

» *Respiration* : après une inspiration profonde, les mouvements respiratoires sont presque arrêtés complètement pendant 20 secondes environ; ils se rétablissent ensuite progressivement.

» On constate une brûlure très importante sous l'électrode de la patte postérieure gauche, la chair a complètement disparu et les os sont à nu. L'électrode est placée à la patte postérieure droite.

» *Cinquième application de la tension* (3 minutes plus tard) : mêmes conditions que précédemment, sauf $T = 2$ secondes (*Pl. VIII*).

» *Cœur* : accélération des mouvements, aussitôt après l'application de la tension, puis ralentissement très marqué au bout de 38 secondes.

» *Respiration* : la respiration, très troublée pendant une vingtaine de secondes, se rétablit peu à peu.

» *Sixième application de la tension* (3 minutes plus tard) : mêmes conditions que précédemment (*Pl. VIII*).

» *Cœur* : arrêt pendant quelques secondes, puis reprise des mou-

vements qui paraissent moins violents que dans les deux cas précédents.

» *Respiration* : tétanos respiratoire pendant 20 secondes environ; la respiration se rétablit ensuite peu à peu.

» *Septième application de la tension* (5 minutes plus tard) (Pl. VIII) :

<i>U</i>	110 v.
<i>I</i>	0,45 a.
<i>T</i>	19 s.
<i>R_{add}</i>	0,0 ohm.
<i>R_{app}</i>	245 ohms.
<i>UI</i>	49,5 va.
<i>UIT</i>	940 j.

» *Cœur et respiration* : arrêt des mouvements dès la fermeture du circuit.

Autopsie : contractions légères des deux ventricules à intervalles de 15 à 20 secondes; contractions fibrillaires et arrêt des oreillettes.

8. CHIEN PESANT 23 kg. *Chloralosé*.

» *Électrodes* : pattes antérieure et postérieure droites (Pl. IX).

<i>U</i>	4500 à 2900 v.
<i>I</i>	8 a.
<i>T</i>	3 s.
<i>R_{add}</i>	0,0 ohm.
<i>R_{app}</i>	362 ohms.
<i>UI</i>	2320 va.
<i>UIT</i>	6960 j.

» *Cœur et respiration* : les mouvements de ces organes s'arrêtent immédiatement.

» *Autopsie* : arrêt du cœur en diastole, trémulations fibrillaires.

9. CHIENNE PESANT 11 kg. *Chloralosée*.

» Pour cette expérience et les suivantes, on a employé le même dispositif expérimental que précédemment; mais au lieu d'appliquer la tension directement entre les électrodes, on a intercalé,

dans le circuit contenant l'animal, une résistance additionnelle de façon à limiter le courant à la valeur voulue ⁽¹⁾.

» *Électrodes* : pattes antérieure et postérieure gauches.

» *Première application de la tension* (Pl. IX) :

U'	1500 v.
I	0,045 a.
T (environ)	0,01 s.
R_{add}	99000 ohms.

» *Cœur* : pas de modifications notables.

» *Respiration* : mouvements accélérés et plus amples pendant une quarantaine de secondes; l'animal paraît rétabli au bout d'une minute.

» *Deuxième application de la tension* (une minute plus tard) : mêmes conditions que précédemment, sauf $T = 50$ secondes (Pl. IX).

» *Cœur* : après la fermeture du circuit, augmentation de la pression sanguine pendant 5 secondes environ, puis diminution pendant une vingtaine de secondes; les battements deviennent ensuite très faibles, tandis que la pression remonte jusqu'au moment de l'ouverture du circuit. La pression diminue ensuite pendant 20 secondes environ et reprend peu à peu sa valeur primitive.

» *Respiration* : les mouvements respiratoires sont arrêtés pendant 30 secondes, puis reprennent très faibles et avec un rythme très rapide jusqu'au moment de l'ouverture du circuit.

» L'animal se rétablit progressivement.

» *Troisième application de la tension* (5 minutes plus tard) : mêmes conditions que précédemment (Pl. X).

» *Cœur* : la canule pour la prise de la pression sanguine est obturée par un caillot; pas d'inscription sur le cylindre.

» *Respiration* : les mouvements respiratoires n'ont été arrêtés

(1) Pour ces expériences, l'intensité du courant traversant l'animal a été tantôt mesuré directement, tantôt calculée d'après la tension et la résistance totale du circuit, en supposant dans ce dernier cas que la résistance du corps de l'animal entre les électrodes était égale à 1000 ohms. Une erreur même importante sur cette résistance ne change pas notablement le résultat, étant donnée la valeur de la résistance additionnelle en série.

On a désigné par U' la tension totale agissant dans le circuit.

que pendant 14 secondes; pendant le reste du temps du passage du courant, ils étaient très rapides et de très faible amplitude; ils se sont rétablis en quelques minutes.

» *Quatrième application de la tension* (environ 8 minutes plus tard) (*Pl. XI*) :

» *Électrodes* : patte antérieure gauche et patte postérieure droite.

» La canule pour la prise de la pression sanguine est placée dans une autre artère.

» Les autres conditions sont les mêmes que précédemment, sauf $T = 53$ secondes.

» *Cœur et respiration* : les phénomènes observés pendant les expériences précédentes se reproduisent dans leurs grandes lignes, mais atténués; les mouvements respiratoires n'ont pas été arrêtés complètement, ils ont été très faibles et très rapides pendant environ 25 secondes durant le passage du courant.

» L'animal se rétablit en quelques minutes.

» *Cinquième application de la tension* (7 minutes plus tard) : mêmes conditions que précédemment. $T = 50$ secondes (*Pl. XI*).

» *Cœur et respiration* : même allure générale des phénomènes, mais les mouvements du cœur et de la respiration sont moins anormaux pendant le passage du courant.

» L'animal se rétablit.

» *Sixième application de la tension* (8 minutes plus tard) : mêmes conditions que précédemment, sauf $T = 2$ minutes 30 secondes (*Pl. XII*).

» *Cœur* : oscillations très importantes de la pression sanguine, pendant une partie de la durée du passage du courant; un caillot dans la canule empêche ensuite l'inscription.

» *Respiration* : respiration très haletante, pendant une demi-minute environ; les mouvements s'arrêtent ensuite presque complètement jusqu'au moment de l'ouverture du circuit.

» L'animal se rétablit.

» *Septième application de la tension* (9 minutes plus tard) : mêmes conditions et mêmes phénomènes que précédemment (*Pl. XIII*).

» *Huitième application de la tension* (13 minutes plus tard) :

U'	4500 v.
I	0,092 a.
T (min.).....	2,5 s.
R_{add}	49000 ohms.

» Pas d'inscription. Arrêt des mouvements du cœur et de la respiration.

» *Autopsie* : cœur arrêté en diastole, trémulations fibrillaires.

10. CHIEN PESANT 13 kg. *Chloralosé*.

» *Électrodes* : pattes antérieure et postérieure droites. Pression sanguine prise dans la carotide.

» *Première application de la tension* (Pl. XIII) :

U'	4500 v.
I	0,045 a.
T	120 s.
R_{add}	99000 ohms.

» *Cœur* : accroissement de la pression sanguine et arrêt des mouvements, pendant 30 secondes environ; les battements se rétablissent et la pression se maintient très élevée pendant le reste du temps du passage du courant; il y a, comme d'ordinaire, une chute brusque de pression au moment de l'ouverture du circuit, les mouvements reprennent ensuite peu à peu une allure normale.

» *Respiration* : mouvements excessivement faibles pendant une dizaine de secondes; puis, respiration haletante, jusqu'au moment de l'ouverture du circuit.

» L'animal se rétablit.

» *Deuxième application de la tension* (13 minutes plus tard) : mêmes conditions que précédemment (Pl. XIV).

» Les phénomènes se reproduisent à peu près identiquement, sauf que la pression sanguine passe par un maximum une dizaine de secondes après la mise en circuit et que les mouvements respiratoires ne commencent à être haletants qu'après le début du passage du courant.

» *Troisième application de la tension* (5 minutes plus tard) :

U'	4500 v.
I	0,089 a.
T	17 s.
R_{add}	49500 ohms.

Arrêt immédiat du cœur et de la respiration.

11. CHIEN PESANT 12 kg.

» L'animal n'a pas été insensibilisé et n'a subi aucune préparation.

» *Électrodes* : pattes antérieure et postérieure droites.

U'	4500
I	0,045
T (min.)	4
R_{add}	99000

» L'animal pousse quelques hurlements au moment de la fermeture du circuit; les yeux se révulsent au bout de 3 minutes 20 secondes.

» Après le passage du courant, l'animal a été posé à terre; il s'est relevé seul au bout de 2 minutes environ, a fait quelques pas en chancelant, puis est retombé; polypnée très accentuée.

» Au bout de quelques minutes, l'animal semble aller beaucoup mieux; il a été mis en observation et s'est très bien rétabli.

12. CHIENNE PESANT 8,51 kg. *Chloralosée*.

» Pas d'autre préparation; pas d'inscription.

» Les autres conditions étaient les mêmes que dans le cas précédent, sauf que le courant a été maintenu pendant 10 minutes.

» L'animal meurt pendant le passage du courant; la mort semble être arrivée vers la neuvième minute.

13. CHIEN PESANT 19 kg. *Chloralosé*.

» *Électrodes* : pattes antérieure et postérieure droites.

» *Première application de la tension (Pl. XV) :*

U'	4400 v.
I	0,059 a.
T	65 s.
R_{add}	74500 ohms.

» *Cœur* : augmentation de la pression sanguine après la fermeture du circuit, le maximum est atteint après 10 secondes environ, le cœur continue à battre pendant le passage du courant, mais de plus en plus irrégulièrement; diminution de la pression après l'ouverture du circuit et rétablissement progressif. D'après le diagramme, l'amplitude des mouvements semble s'affaiblir au bout de quelque temps, mais cette diminution d'amplitude est due à la formation d'un caillot dans la canule.

» *Respiration* : les mouvements respiratoires sont très faibles et très rapides pendant 30 secondes environ; puis s'arrêtent presque, jusqu'à l'ouverture du circuit; ils se rétablissent ensuite progressivement.

» *Deuxième application de la tension* (24 minutes plus tard) : mêmes conditions que précédemment, sauf $T = 49$ secondes (Pl. XVI). La canule pour la prise de la pression sanguine a été placée dans l'autre artère fémorale.

» *Cœur* : les mouvements du cœur deviennent très troublés au bout d'une vingtaine de secondes après la fermeture du circuit; ils s'arrêtent au moment de l'ouverture.

» *Respiration* : mêmes phénomènes que précédemment, pendant la durée du passage du courant; quelques souffles agoniques, après l'ouverture du circuit.

» *Autopsie* : trémulations fibrillaires du cœur.

14. CHIEN PESANT 13,5 kg. *Sans aucune préparation; pas d'inscription.*

» Mêmes conditions que dans l'expérience précédente, sauf $T = 65$ secondes. Mort. La respiration artificielle a été essayée sans résultat.

15. CHIEN PESANT 11 kg. *Chloralosé.*

» *Électrodes* : pattes antérieure et postérieure droites.

» *Première application de la tension (Pl. XVI) :*

U'	4450 v.
I	0,059 a.
T	60 s.
R_{add}	74500 ohms.

» *Cœur* : la pression sanguine augmente peu à peu pendant le passage du courant et atteint son maximum quelques secondes après l'ouverture du circuit; les mouvements du cœur, qui sont très faibles pendant 30 secondes environ, deviennent désordonnés ensuite. La pression diminue après le passage du courant et passe par un minimum 20 secondes environ après l'ouverture du circuit.

» Les mouvements deviennent ensuite assez réguliers; sur le diagramme, ils paraissent s'affaiblir, mais ceci tient à la formation d'un caillot dans la canule.

» *Respiration* : tétanos respiratoire presque complet pendant la durée du passage du courant; les mouvements se rétablissent ensuite progressivement.

» *Deuxième application de la tension (27 minutes plus tard) (Pl. XVII) :*

» La canule pour la prise de la pression sanguine a été changée de côté.

U''	4340 v.
I	0,058 a.
T	60 s.
R_{add}	74500 ohms.

» Phénomènes ayant la même allure générale que dans le cas précédent.

» L'animal se rétablit.

» *Troisième application de la tension (4 minutes plus tard) :* mêmes conditions que précédemment (*Pl. XVII*).

» Même allure générale des phénomènes; les mouvements respiratoires ont une amplitude un peu plus grande pendant le passage du courant.

» L'animal se rétablit.

» *Quatrième application de la tension (11 minutes plus tard) :* mêmes conditions que dans l'expérience précédente, sauf $T = 90$ secondes. Pas d'enregistrement. Mort.

16. CHIEN PESANT 8 kg. *Sans aucune préparation.*

» *Électrodes* : pattes antérieure et postérieure droites.

U'	4380 v.
I	0,034 a.
T (min.)	10 s.
R_{add}	128000 ohms.

» L'animal meurt par asphyxie.

» La traction de la langue et la respiration artificielle ont été essayées sans résultat.

17. CHIEN PESANT 18 kg. *Chloralosé.*

» *Électrodes* : sur le sommet du crâne et sous le menton (électrodes constituées par des fils de cuivre enfoncés sous la peau).

» Pas d'inscription sur le cylindre tournant.

» *Première application de la tension* :

U	1080 v.
I	0,098 a.
T	15 s.
R_{add}	10000 ohms.

» Mouvements convulsifs; l'animal se rétablit.

» *Deuxième application de la tension* (5 minutes plus tard) : mêmes conditions que précédemment, sauf $T = 2$ minutes, secousses cloniques. L'animal se rétablit.

» *Troisième application de la tension* (6 minutes plus tard) : l'électrode placée sous le menton est transportée à l'artère fémorale droite. Les autres conditions sont les mêmes que précédemment, sauf $T = 15$ secondes. Quelques secousses cloniques; arrêt du cœur et de la respiration. Mort.

» *Autopsie* : trémulations fibrillaires du cœur.

18. CHIENNE PESANT 11,5 kg. *Chloralosée.*

» *Électrodes* : sur le sommet du crâne et sous le menton.

» *Première application de la tension (Pl. XVIII) :*

U'	1100 v.
I	0,10 a.
T	118 s.
R_{add}	10000 ohms.

» *Cœur* : chute brusque de la pression sanguine au moment de la fermeture du courant; les mouvements sont arrêtés pendant 23 secondes, le cœur se remet ensuite à battre lentement et avec force jusqu'au moment de l'ouverture du circuit (nombre de battements par minute avant la fermeture du circuit, 80 environ; pendant le passage du courant, 36 environ). La pression diminue à nouveau, passe par un minimum à partir duquel les battements restent très faibles pendant une cinquantaine de secondes; ils se régularisent ensuite peu à peu.

» *Respiration* : les mouvements respiratoires sont arrêtés pendant toute la durée du passage du courant et pendant 40 secondes après, soit en tout pendant 2 minutes 38 secondes. Ils se rétablissent ensuite, la respiration restant très haletante pendant quelques minutes.

» *Deuxième application de la tension* (35 minutes plus tard) :

» Mêmes conditions que précédemment (Pl. XIX).

» Les phénomènes se reproduisent à peu près identiquement; le cœur est resté arrêté pendant 35 secondes et la respiration pendant 125 secondes.

» L'animal se rétablit.

» *Troisième application de la tension* (quelques minutes plus tard) :

» L'électrode du cou est placée dans l'artère fémorale gauche à la place de la canule de prise de la pression sanguine.

» Pas d'inscription.

» Les autres conditions sont les mêmes que précédemment, sauf $T = 25$ secondes.

» Mort.

» *Autopsie* : trémulations fibrillaires du cœur.

19. CHIEN PESANT 6 kg. *Sans aucune préparation.*

» *Électrodes* : sur le sommet du crâne et sous le menton. Pas d'inscription.

U'	1090 v.
I	0,099 a.
T	2 m.
R_{add}	10000 ohms.

» Après le passage du courant, l'animal a été posé à terre; il s'est mis à courir au bout de 9 minutes environ; il s'est très bien rétabli.

20. CHIEN PESANT 6 kg. *Sans préparation.*

» Ce chien avait servi pour l'expérience 19, une semaine avant.

» *Électrodes* : sur le sommet du crâne et sous le menton. Pas d'inscription.

» *Première application de la tension* :

U'	1080 v.
I	0,423 à 0,427 a.
T	30 s.
R_{add}	2500 ohms.

» L'animal se rétablit.

» *Deuxième application de la tension* (30 secondes plus tard) : mêmes conditions que précédemment; l'intensité efficace du courant atteint 0,430 ampère, au moment de l'ouverture du circuit.

» Après cette expérience, l'animal a été placé à terre; il s'est relevé au bout de 7 minutes environ; il se défend quand on veut le saisir.

» *Troisième application de la tension* (12 minutes plus tard) :

» *Électrodes* : pattes antérieure et postérieure droites.

U'	1080 v.
I	non mesuré.
T	5 s.
R_{add}	2500 ohms.

» Mort immédiate.

21. CHIEN PESANT 12,5 kg. *Sans aucune préparation.*

» *Électrodes* : sur le sommet du crâne et sous le menton. Pas d'inscription sur le cylindre.

U'	1090 v.
I	0,413 a.
T	30 s.
R_{add}	2500 ohms.

» Après le passage du courant, l'animal placé à terre s'est mis à courir aussitôt et s'est très bien rétabli.

22. CHIEN PESANT 24 kg. *Chloralosé*.

» *Électrodes* : sur le sommet du crâne et sous le menton.

» *Première application de la tension* (Pl. XX) :

U	1080 v.
I	0,385 a.
T	35 s.
R_{add}	2500 ohms.

» Brûlure à l'une des électrodes; l'intensité du courant diminuant sensiblement, on a coupé le courant et refait le contact pour l'expérience suivante.

» *Cœur* : chute brusque de la pression sanguine au moment de la fermeture du circuit; la pression remonte ensuite en quelques secondes à une valeur très élevée; elle diminue peu à peu après l'ouverture du circuit. Les battements du cœur n'ont été arrêtés à aucun moment; ils deviennent très violents et désordonnés après le passage du courant.

» *Respiration* : les mouvements respiratoires sont suspendus pendant la durée de la fermeture du circuit; ils se rétablissent ensuite progressivement.

» *Deuxième application de la tension* (95 secondes plus tard) (Pl. XX) :

U'	1090 v.
I	0,417 a.
T	58 s.
R_{add}	2500 ohms.

» L'allure générale des phénomènes est la même que dans le cas précédent, sauf que les mouvements respiratoires ne se rétablissent que 40 secondes environ après l'ouverture du circuit.

» *Troisième application de la tension* (12 minutes plus tard) :

mêmes conditions que précédemment; $I = 0,420$ ampère (*Pl. XXI*).
Mêmes phénomènes; les mouvements du cœur sont de plus en plus désordonnés, la pression sanguine subit des variations très importantes; la respiration ne se rétablit que 45 secondes après l'ouverture du circuit.

» *Quatrième application de la tension* (5 minutes plus tard) :

» L'électrode du cou est placée à la patte postérieure droite. Les autres conditions restent les mêmes que dans l'expérience précédente, sauf $T = 5$ secondes.

» Mort immédiate par arrêt du cœur; quelques souffles agoniques.

23. CHIEN PESANT 20 kg. *Chloralosé*.

» *Électrodes* : sur le sommet du crâne et sous le menton.

» Dans cette expérience on a mesuré la différence de potentiel entre les deux électrodes; c'est cette différence de potentiel qui est désignée dans la suite par U' , comme dans les expériences pour lesquelles il n'y avait pas de résistance additionnelle en série avec l'animal.

» *Première application de la tension* (*Pl. XXII*) :

U	1100 v.
U'	200 à 150 v.
I	0,400 a.
T	32 s.
R_{add}	2500 ohms.
R_{app}	375 ohms.
$U'I$	60 va.
$U'IT$	1920 j.

» *Cœur* : chute de la pression sanguine, au moment de la fermeture; puis, accroissement très important de cette pression, jusqu'à l'ouverture du circuit. La pression diminue ensuite pendant une quarantaine de secondes; puis croît à nouveau, jusqu'au moment de la deuxième application de la tension qui a lieu 2,5 minutes plus tard. Les mouvements du cœur sont tout à fait désordonnés et la pression subit des variations considérables. Nombre de battements par minute avant l'application de la tension: environ 112; après le passage du courant, 36 à 50.

- » *Deuxième application de la tension* (2,5 minutes plus tard) :
 » *Électrodes* : pattes antérieure et postérieure droites.

U'	1100 v.
U''	170 v.
I	0,190 à 0,200 a.
T	15 s.
R_{add}	5000 ohms.
R_{app}	850 ohms.
$U'I$	34 va.
UIT	510 j.

» Les mouvements du *cœur* et de la *respiration* s'arrêtent dès la fermeture du circuit; quelques souffles agoniques.

24. CHIEN PESANT 12,5 kg. *Sans préparation.*

» Ce chien avait déjà été employé pour l'expérience n° 20 et s'était très bien rétabli.

» L'animal a été attaché sur une planche en bois et la patte antérieure droite a été reliée à l'une des bornes d'un transformateur alimenté par du courant fourni par le Secteur de la Rive gauche.

» La planche était placée sur une table recouverte de toile cirée; la table était isolée du sol (plancher en bois) par des cristallisoirs en verre et des isolateurs en porcelaine disposés sous les pieds.

» On a fait, dans ces conditions, les expériences suivantes :

» 1° Le deuxième pôle du transformateur étant isolé, la tension efficace a été élevée progressivement jusqu'à 45000 volts sans que l'animal manifeste aucune douleur.

» 2° Le deuxième pôle du transformateur étant en communication avec le plancher, la tension efficace a été élevée jusqu'à 45000 volts sans que l'animal manifeste aucune douleur.

» 3° Le deuxième pôle du transformateur étant en communication avec le pied de la table le plus éloigné de l'électrode de la patte, la tension efficace a été élevée progressivement jusqu'à 45000 volts sans que l'animal manifeste aucune douleur.

» 4° Le deuxième pôle du transformateur étant relié à un contact placé sous la planche supportant l'animal, à peu près sous les reins, l'animal a fait de violents efforts pour se dégager à partir de 20500 volts.

» 5° Dans les mêmes conditions que précédemment, mais après avoir humecté la planche avec une éponge, l'animal crie à partir de 7500 volts et est tétanisé vers 15000 volts. Le courant ayant été coupé au bout de quelques secondes, l'animal se rétablit.

» La tension a été appliquée à nouveau et élevée jusqu'à 22500 volts; les mêmes phénomènes se sont reproduits et l'animal s'est encore rétabli.

» Enfin, la tension efficace a été amenée progressivement à 30000 volts et maintenue à cette valeur pendant 2 secondes.

» L'animal est mort quelques minutes après l'ouverture du circuit.

» L'intensité efficace du courant débité par le transformateur, dans la dernière expérience, était d'environ 0,12 ampère; il faut remarquer qu'une partie seulement de ce courant passait à travers le corps de l'animal qui était simplement attaché sur la planche.

Les expériences de la première série ont été résumées dans les Tableaux suivants :

ABREVIATIONS EMPLOYÉES DANS LES TABLEAUX POUR DÉSIGNER LA PLACE DES ÉLECTRODES.

P _{ad} ; P _{ag}	Patte antérieure droite; patte antérieure gauche.
P _{pd} ; P _{pg}	Patte postérieure droite; patte postérieure gauche.
C.....	Dessus du crâne.
M.....	Dessous du menton.
A _{fd} ; A _{fg}	Artère fémorale droite; artère fémorale gauche.

Numéro du chien.	de l'expé- rience.	Poids de l'animal.	Électrodes.	Tension eff. (volts)		Courant eff. (Amp.)	Temps T.	Résistance (ohms)		U/I Volt-amp.	UIT Joules.	Observations.
				totale élec- trique	entre trodes			addi- tionnelle	appara- rente			
		kg		U''	U'	I	m^2	R_{add}	R_{app}			
1.....	I	21,7	P _{ad} -P _{pg}	42	42	0,042	0 50	0	1000	1,76	88	Se rétablit.
	II		P _{ad} -P _{pg}	42	42	0,047	0 68	0	894	1,97	134	Se rétablit.
	III		P _{ad} -P _{pg}	42	42	0,047	0 46	0	894	1,97	90	Se rétablit.
	VI		P _{ad} -P _{pg}	100	100	0,145	0 35	0	690	14,5	507	Arrêt respiration.
	V		P _{ad} -P _{pg}	100	100	—	0 12	0	—	—	—	Arrêt du cœur.
2.....	I	13,07	P _{ad} -P _{pd}	58	58	0,035	0 32	0	1656	2,03	63	Se rétablit.
	II		P _{ad} -P _{pd}	58	58	0,038	0 60	0	1526	2,2	132	Se rétablit.
	III		P _{ad} -P _{pd}	103	103	0,068	0 3	0	1516	7	21	Mort. Cœur.
3.....	I	18,3	P _{ad} -P _{pg}	100	100	0,116	0 24	0	862	11,6	278	Mort. Cœur.
4.....	I	23	P _{ad} -P _{pg}	380	380	0,600	0 12	0	633	228	2730	Mort. Cœur.
5.....	I	14	P _{ad} -P _{pd}	1140	1140	1,5	0 18	0	760	2460	38900	Mort. Cœur et respiration.
				à à	à à	à à			à à			
6.....	I	30	P _{ad} -P _{pd}	2250	2250	4,6	0 3	0	376	7960	93900	Mort. Cœur et respiration.
				à à	à à							

Numéro du chien.	Poids de l'expé- rience.	kg	Electrodes.	Tension eff. (volts)		Courant ef. (Amp.)	Temps T.	Résistance (ohms)		UI Volt-amp.	UIT Joules.	Observations.
				entre tctale élec. U, trodes U.	entre tctale élec. U, trodes U.			addi- tionnelle R _{add} .	appa- rente R _{app} .			
I		10,8	P _{ag} -P _{pg}	4600	4600	—	0 02	0	—	—	—	
II			P _{ag} -P _{pg}	3800	3800	—	0 02	0	—	—	—	Se rétablit. Brûlures.
III		10,8	P _{ag} -P _{pg}	4600	4600	7	0 3	0	386	18900	56700	Se rétablit. Brûlures.
IV			P _{ag} -P _{pg}	2700	2700	—	0 3	0	—	—	—	Se rétablit. Brûlures.
V			P _{ag} -P _{pd}	2700	2700	—	0 2	0	—	—	—	Se rétablit. Brûlures.
VI			P _{ag} -P _{pd}	2700	2700	—	0 2	0	—	—	—	Se rétablit. Brûlures.
VII			P _{ag} -P _{pd}	110	110	0,45	0 19	0	245	49,5	940	Se rétablit. Brûlures. Mort. Cœur et respiration.
I		23	P _{ad} -P _{pd}	4500	4500	8	0 3	0	360	2300	6960	Mort. Cœur et respiration.
8.....				2900	2900							

Numéro du chien.	de l'expé- rience.	Poids de l'animal.	Électrodes.	Tension ^{off.} (volts)		Courant ef. (Amp.)	Temps T.	Résistance (ohms)		U ^I Volt-amp.	U ^{IT} Joules.	Observations.
				totale U ⁷ .	entre élec- trodes U ⁷ .			addi- tionnelle R _{add} .	appa- rente R _{app} .			
9.....		11 kg	P _{ag} -P _{ag}	4500	—	0,045	0 01	99 000	—	—	—	Se rétablit.
			P _{ag} -P _{pg}	4500	—	0,045	0 50	99 000	—	—	—	Se rétablit.
			P _{ag} -P _{pg}	4500	—	0,045	0 50	99 000	—	—	—	Se rétablit.
			P _{ag} -P _{pd}	4500	—	0,045	0 53	99 000	—	—	—	Se rétablit.
			P _{ag} -P _{pd}	4500	—	0,045	0 50	99 000	—	—	—	Se rétablit.
			P _{ag} -P _{pd}	4500	—	0,045	2 30	99 000	—	—	—	Se rétablit.
			P _{ag} -P _{pd}	4500	—	0,045	2 30	99 000	—	—	—	Se rétablit.
			P _{ag} -P _{pd}	4500	—	0,092	2 30	49 000	—	—	—	Mort. Cœur et respiration.
10.....		13	P _{ad} -P _{pd}	4500	—	0,045	2 00	99 000	—	—	—	Se rétablit.
			P _{ad} -P _{pd}	4500	—	0,045	2 00	99 000	—	—	—	Se rétablit.
			P _{ad} -P _{pd}	4500	—	0,089	0 17	49 500	—	—	—	Mort. Cœur et respiration.
11.....	I	12	P _{ad} -P _{pd}	4500	—	0,045	4 00	99 000	—	—	—	Se rétablit.
12.....	I	8,51	P _{ad} -P _{pd}	4500	—	0,055	10 00	99 000	—	—	—	Mort.
13.....	I	19	P _{ad} -P _{pd}	4400	—	0,049	0 65	74 500	—	—	—	Se rétablit.
			P _{ad} -P _{pd}	4400	—	0,049	0 49	74 500	—	—	—	Mort. Cœur et respiration.
14.....	I	13,5	P _{ad} -P _{pd}	4400	—	0,049	0 65	74 500	—	—	—	Mort.
15.....	I	11	P _{ad} P _{pd}	4450	—	0,059	1 00	74 500	—	—	—	Se rétablit.
			P _{ad} -P _{pd}	4340	—	0,038	1 00	74 500	—	—	—	Se rétablit.
			P _{ad} -P _{pd}	4340	—	0,038	1 00	74 500	—	—	—	Se rétablit.
			P _{ad} -P _{pd}	4340	—	0,038	1 30	74 500	—	—	—	Mort.
16.....	I	8	P _{ad} -P _{pd}	4380	—	0,034	10 00	128 000	—	—	—	Mort. Respiration

Numéro du chien.	de l'expé- rience.	Poids de l'animal.	Électrodes.	Tension eff. (volts)		Courant ef. (Amp.) <i>I</i> .	Temps T. ^m s	Résistance (ohms)		<i>U</i> Volt-amp.	<i>UIT</i> Joules.	Observations.
				totale <i>U'</i> .	entre élec- trodes <i>U</i> .			addi- tionnelle <i>R_{add}</i> .	appa- rente <i>R_{app}</i> .			
17.....	I	18 ^{kg}	C-M	1080	—	0,098	0 45	10000	—	—	—	Se rétablit.
	II		C-M	1080	—	0,098	2 00	10000	—	—	—	Se rétablit.
	III		C-A _d	1080	—	0,098	0 15	10000	—	—	—	Mort. Cœur et respiration.
18.....	I	11,5	C-M	1100	—	0,10	1 58	10000	—	—	—	Se rétablit.
	II		C-M	1100	—	0,10	1 58	10000	—	—	—	Se rétablit.
	III		C-A _{rg}	1100	—	0,10	0 25	10000	—	—	—	Mort.
19.....	I	6	C-M	1090	—	0,099	2 00	10000	—	—	—	Se rétablit.
	I	6	C-M	1080	—	0,123 à	0 30	2500	—	—	—	Se rétablit.
20.....	II		C-M	1080	—	0,127	0 30	2500	—	—	—	Se rétablit.
	III		C-M	1080	—	—	0 5	2500	—	—	—	Mort.
21.....	I	12,5	C-M	1090	—	0,113	0 30	2500	—	—	—	Se rétablit.
	I	24	C-M	1080	—	0,385	0 35	2500	—	—	—	Se rétablit.
	II		C-M	1090	—	0,117	0 58	2500	—	—	—	Se rétablit.
	III		C-M	1090	—	0,120	0 58	2500	—	—	—	Se rétablit.
22.....	IV		M-P _{ad}	1090	—	—	0 5	2500	—	—	—	Mort. Cœur.
	I	20	C-M	1100	200 à	—	0 32	2500	375	60	1920	Se rétablit.
	II		P _{ant} -P _{pd}	1100	150 à	0,400	0 15	5000	850	34	510	Mort. Cœur et respiration.
	II				170 à	0,190	0 15	5000	850	34	510	Mort. Cœur et respiration.

NOTE I.

Expériences sur les installations isolantes de fortune.

» Ces expériences ont été faites dans le but de se rendre compte des valeurs des résistances d'isolement qu'on peut obtenir en constituant des tabourets ou planchers isolants au moyen d'objets qu'on trouve facilement presque partout; par exemple, planches, bouteilles, verres à boire, bols.

» On a également essayé quelles charges pouvaient supporter de tels systèmes.

» On a pris un couvercle de caisse en bois qui a été posé successivement sur différents objets, lesquels étaient eux-mêmes placés sur une plaque en fer.

» On a mesuré dans chaque cas la résistance d'isolement entre le plateau en bois et la plaque en fer (dimensions du plateau : 1 m $\times$ 0,80 m).

» 1^o *Bouteilles d'eau de Saint-Galmier couchées (fig. 3).*

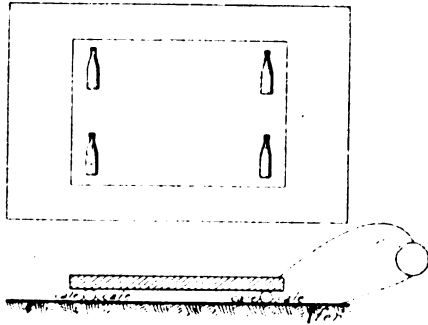


Fig. 3.

» A sec, la résistance d'isolement est supérieure à 5 mégohms.

» Au moment où l'on jette un seau d'eau sur la planche, la résistance tombe à 10000 ohms; elle remonte en quelques secondes à 50000, puis à 100000 ohms; 2 minutes plus tard, elle atteint 200000 ohms.

» Au point de vue mécanique, les bouteilles résistent bien lorsque deux hommes montent sur le plateau; elles ont cassé plusieurs fois sous le poids de trois hommes.

» 2^o *Bouteilles d'eau de Saint-Galmier droites.* — Avec le couvercle et les bouteilles mouillées par l'expérience précédente, on a relevé une résistance d'isolement supérieure à 5 mégohms.

» Quand on jette de l'eau, la résistance tombe à 50000 ohms.

» On a obtenu les mêmes résultats avec des bouteilles remplies d'eau.

» Ce dispositif n'est pas stable.

» 3^o *Bouteilles d'eau de Vichy.* — Les mêmes expériences ont été répétées avec des bouteilles d'eau de Vichy; elles ont donné des résultats tout à fait analogues aux précédents.

» 4^o *Bols en faïence (fig. 4).* — Le plateau étant mouillé et les

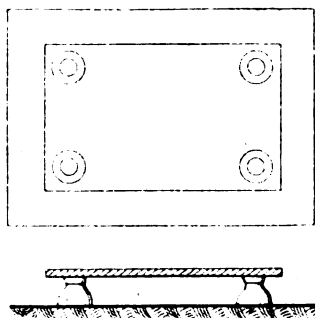


Fig. 4.

bols (4) secs, on a relevé une résistance d'isolement de 3 mégohms.

» Cette résistance tombe à 10000 ohms lorsqu'on lance un seau d'eau; elle remonte en quelques secondes à 100000 ohms, puis à 1 mégohm.

» Les bols permettent de faire un tabouret très stable; ils ont pu supporter quatre hommes sans se briser.

» *Assiettes en faïence.* — Quatre assiettes disposées comme les bols se brisent sous le poids d'un homme; il est vrai qu'on n'avait intentionnellement pris aucune précaution pour faire porter convenablement les bords des assiettes sur la plaque.

» 6^o *Gobelets en verre ordinaire.* — A sec, la résistance d'isolement est supérieure à 5 mégohms; lorsqu'on lance un seau d'eau, elle tombe à 300000 ohms et remonte à 2 mégohms environ en 3 minutes.

» Les verres plongés dans l'eau, égouttés et remis en place présentent une résistance d'isolement supérieure à 5 mégohms.

» Le support ainsi établi est assez stable; il a pu supporter quatre hommes sans rupture.

NOTE II.

Capacité, par rapport à la terre, d'un homme placé sur un support isolant.

» On a mesuré la capacité, par rapport à la terre, d'un homme chaussé et placé soit sur une plaque de verre, soit sur un tabouret isolant.

» 1^o Homme placé sur une plaque de verre ordinaire ayant 3,5 mm d'épaisseur :

$$C = 0,0009 \text{ microfarad.}$$

» Cette valeur est de l'ordre de celle trouvée par le calcul en admettant que le pouvoir inducteur spécifique du verre est compris entre 7 et 10 et la surface des chaussures égale à 400 cm².

» 2^o Homme placé sur une planche en bois supportée par quatre isolateurs d'environ 10 cm de hauteur :

$$C = 0,00016 \text{ microfarad.}$$

OBSERVATIONS DU RAPPORTEUR.:

» La conclusion pratique à tirer des expériences résumées dans les Tableaux des pages précédentes est que, toutes autres conditions restant égales, le danger du courant, danger caractérisé par la mort, est en rapport direct avec l'intensité jusqu'à une certaine valeur et avec le temps de passage du courant.

» D'autre part, ce danger paraît particulièrement grave lorsque le cœur se trouve placé dans le circuit.

» Ces trois facteurs (*intensité, temps, disposition du circuit*) méritent chacun un exposé plus détaillé.

» *De l'intensité.* — Toutes autres conditions restant égales, on constate que *le danger augmente avec l'intensité*; vers 0,080 ampère, ce danger devient généralement mortel pour des chiens.

» Les expériences 2-III, 9-VIII, 10-III montrent d'une manière précise l'exactitude de cette conclusion qui est vérifiée jusqu'à la valeur de 4,6 ampères par les expériences effectuées sur les chiens 3, 4, 5, 6 et 7-VII.

» Il est impossible d'affirmer que cette règle se vérifierait encore au-dessus de cette valeur; les résultats des expériences exécutées sur le chien n° 7 sont assez troublants à cet égard; cet animal a pu supporter à six reprises consécutives un courant qui a atteint 7 ampères, sans succomber; la mort n'est survenue que lorsque l'intensité a été ramenée à 0,45 ampère.

» Il est à noter que si, du côté du cœur, l'animal a pu supporter, pendant des temps variables entre 0,2 seconde et 0,3 seconde, une intensité aussi élevée, il n'en a pas été de même du côté du corps; sous l'influence thermique ou électrolytique du courant dès la quatrième application, l'animal était *gravement brûlé*.

» Au point d'attache de l'électrode, sur la patte postérieure gauche, la chair avait complètement disparu et les os étaient à nu.

» L'action prédominante de l'intensité sur les résultats des expériences se manifeste encore si l'on compare les tensions employées.

» On remarquera par exemple (expériences 9-I à VII) qu'un chien supporte sans trop d'inconvénient un courant à haute tension (4500 volts), mais de faible intensité (0,45 ampère), tandis que, pour des intensités plus élevées, la mort est déterminée par des courants à basse tension : 100 volts (expériences I-IV et V), 103 volts (expérience 2-III), 380 volts (expérience 4).

» *Du temps de passage du courant.* — Le temps de passage du courant dans le corps de l'animal électrocuté semble, jusqu'à une certaine valeur, avoir une action directe sur les résultats de l'expérience : on remarquera en particulier le chien n° 7, déjà cité, qui résiste (expériences V et VI) à 4600 et à 2700 volts pendant 2 secondes et qui succombe lorsque l'application du courant à 110 volts se prolonge pendant 19 secondes, bien que l'intensité n'ait été que de 0,45 ampère.

» On peut également comparer les expériences des chiens 11 et 12 qui donnent un résultat de même sens, et avec plus de certitude encore.

» Le premier (12 kg) résiste, soumis pendant 4 minutes à l'action d'un courant égal à 4500 volts et à 0,45 ampère; le second (8,51 kg) dans les mêmes conditions de tension et d'application, mais avec une très légère augmentation d'intensité (0,55 ampère), meurt au bout de 9 minutes.

» *Variations résultant de l'emplacement des électrodes.* — On peut affirmer d'une manière absolue que le cœur est l'organe le plus sensible et que, dans la presque totalité des cas, c'est le seul arrêt de son fonctionnement qui détermine la mort. Son action prédominante sous l'influence du courant électrique est mise en évidence d'une façon remarquable par les résultats des expériences effectuées sur les chiens 17, 18, 19, 21, 22 et 23.

» Dans les mêmes conditions (d'intensité et de tension), nous voyons que les mêmes animaux, qui résistent parfaitement lorsque le courant leur est appliqué par l'intermédiaire d'électrodes fixées au sommet du crâne et sous le menton, succombent lorsque les électrodes sont déplacées et réunies aux pattes postérieures et antérieures, de manière à placer le cœur dans le circuit (expériences 17, 18, 22 et 23).

» En résumé, des expériences qui viennent d'être énumérées, et aussi des expériences 19 et 21, on peut affirmer que la théorie qui faisait quelquefois imputer la mort par électrocution à l'inhibition des centres nerveux, et en particulier à ceux qui commandent la respiration, n'est pas fondée : en effet, toutes les fois que le cœur est exclu du circuit, l'animal résiste avec des accidents cardiaques et respiratoires passagers, mais sans troubles définitifs; et si, dans d'autres expériences, on a pu noter, en même temps que l'arrêt du cœur, un arrêt momentané ou définitif de la respiration déterminant une asphyxie consécutive, on est en droit d'attribuer cet arrêt de la respiration à une contraction musculaire du thorax, qui détermine la compression des organes respiratoires; cette contraction peut d'ailleurs être encore provoquée si on lance le courant dans le corps d'un animal mort depuis quelques instants; elle doit donc être rattachée à une action musculaire excluant l'intervention prédominante du cerveau; il est encore à noter que, dans le cas où les électrodes sont placées sur le crâne et sous le menton, la respi-

ration se rétablit seule lorsque le courant cesse de passer, si d'autre part le cœur a repris ses mouvements normaux (expériences I-IV, 7-III, 7-IV, 7-VI, 9-II, 9-VI).

» Dans certains cas, la respiration, à peu près complètement suspendue pendant 80 à 90 secondes (expérience 9-VI), reprend naturellement son cours régulier, lorsque le courant est supprimé. Cette constatation des plus importantes sera à retenir lorsqu'on se préoccupera des soins à donner aux électrocutés.

» Avant de formuler des conclusions définitives, il importe de se préoccuper dans quelles mesures les résultats qui découlent des expériences pratiquées sur des chiens peuvent être étendues à des individus.

» La conclusion la plus importante au point de vue industriel est celle qui fait varier le danger du courant avec son intensité, en ramenant la valeur de la tension, dans le cas d'un accident, à une importance secondaire; en effet, si cette conclusion, exacte quant aux animaux, est admise pour les individus, on serait conduit à conclure que les courants industriels de première catégorie, pour ne parler que de ceux qui sont employés dans les applications domestiques et en particulier à l'éclairage, peuvent dans certaines conditions de contact devenir dangereux et même mortels; il suffirait, pour que ce dernier résultat soit atteint, qu'une intensité de courant de 0,100 ampère fût possible à travers le corps de la victime.

» Il est bien évident qu'on ne saurait songer à vérifier cette possibilité par des recherches expérimentales; nous devons donc chercher dans les accidents que nous connaissons des cas d'espèce qui nous permettent d'établir un rapprochement entre les phénomènes physiologiques que nous venons de constater sur des animaux et ceux que les conclusions auxquelles nous avons abouti nous permettent de supposer possibles sur des individus.

» En un mot, il s'agit de discerner si :

» 1^o Des courants alternatifs, à 90 volts, avec une intensité de 0,100 ampère, étant mortels pour des animaux, nous devons les considérer comme tels pour les individus;

» 2^o Ces conditions peuvent-elles se produire accidentellement?

» A cette question si importante, la réponse n'est malheureuse-

ment pas douteuse, et les exemples que nous rappelons ci-après et qui pourraient être multipliés, montrent que les conclusions qui découlent des expériences de votre Commission, sans être taxées d'exagération, peuvent être étendues aux individus.

» *Observations de quelques accidents mortels provoqués par de faibles tensions.* — 1^o Le 19 août 1908, un ouvrier maçon, âgé de 42 ans, travaillait à Marseille sur le toit d'un apprentis de l'usine à gaz des Crottes; ce toit était en tôle ondulée et reposait sur une charpente métallique.

» A proximité de la victime passaient les conducteurs d'une distribution triphasée, tension efficace entre conducteurs 190 volts, soit environ 110 volts entre conducteur et terre.

» La victime a touché du front le conducteur le plus bas et est tombée dans son auge, électrocutée.

» Malgré les soins qui lui ont été prodigués, elle n'a pu être ranimée.

» A noter que cet ouvrier était chaussé de pantoufles humides, car à proximité de son poste de travail se trouvait un appareil de réfrigération du gaz d'éclairage, laissant couler de l'eau un peu partout, et la victime s'était forcément mouillé les pieds pour se rendre à son travail.

» 2^o Le 17 octobre 1906, l'ouvrier mineur Paillasse, 38 ans, travaillant dans un abatage (ligne métropolitaine n^o 4), n'étant pas suffisamment éclairé par l'ampoule de la baladeuse, a voulu remettre une autre lampe qui s'est brisée dans sa main. Il tomba foudroyé, fut transporté à l'hôpital de la Charité, où le décès fut constaté.

» L'autopsie a été faite par le Dr Vibert, médecin-légiste, qui a conclu à la mort par électrocution; la victime n'avait aucune lésion interne.

» Courant diphasé à 240 volts entre conducteurs, et 170 volts entre conducteurs et terre.

» 3^o A Lys (Nord), le 7 décembre 1907, l'ouvrier Joseph Delsalle effectuait une réparation sur un conducteur d'une installation souterraine à 200 volts entre conducteurs, soit environ 120 entre conducteur et terre.

» Il descendit dans le caniveau et posa un genou sur le sol; il toucha ensuite le conducteur dont le circuit n'avait pas été supprimé, et fut maintenu en contact par crispation musculaire.

» Il put crier à son camarade qui l'assistait de se dépêcher d'arrêter le moteur; mais, lorsque, quelques instants après, cette opération fut exécutée, la mort était survenue.

» 4° Le 3 février 1908, à l'usine Olivieri, à Nanterre, boulevard Thiers, n° 16, un ouvrier ayant pieds et mains mouillés, fut électrocuté en saisissant sa lampe, il serrait d'une main l'abat-jour et de l'autre main la clef en cuivre de la douille.

» L'autopsie ne lui découvrit aucune tare; l'expert nommé a conclu à une électrocution.

» Courant diphasé, 110 volts.

DEUXIÈME SÉRIE D'EXPÉRIENCES

Effectuées en Mars et Avril 1910.

25. CHIEN PESANT 16,1 kg. *Chloralosé.*

» *Électrodes* : patte antérieure gauche et patte postérieure droite.

» *Courant alternatif* : fréquence, 75 p : s. (*Pl. XXIII*).

<i>U</i>	100 v.
<i>I</i>	0,141 a.
<i>T</i>	10 s.
<i>R_{add}</i>	0,0 ohm.
<i>R_{app}</i>	710 ohms.
<i>UI</i>	14,1 v.-a.
<i>UIT</i>	141 j.

» *Cœur* : chute brusque de la pression sanguine au moment de la fermeture du circuit et arrêt du cœur.

» *Respiration* : les mouvements respiratoires sont suspendus pendant la durée du passage du courant; ils reprennent ensuite très violents, pendant une quarantaine de secondes, puis s'arrêtent.

26. CHIEN PESANT 6 kg. *Sans aucune préparation.*

» Pas d'inscription sur le cylindre tournant.

» *Électrodes* : patte antérieure gauche et patte postérieure droite.

» *Courant alternatif* : fréquence : 75 p : s.

<i>U</i>	76 v.
<i>I</i>	0,103 a.
<i>T</i>	20 s.
<i>R_{add}</i>	0,0 ohm.
<i>R_{app}</i>	738 ohms.
<i>UI</i>	7,8 v.-a.
<i>UIT</i>	156 j.

» L'animal meurt.

» Les tractions rythmées de la langue et la respiration artificielle ont été essayées sans résultat.

27. CHIEN PESANT 9,7 kg. *Chloralosé*.

» *Électrodes* : patte antérieure gauche et patte postérieure droite.

» *Courant alternatif* : fréquence, 27 p : s.

» *Première application de la tension (Pl. XXIII)* :

<i>U</i>	73 v.
<i>I</i>	0,070 a.
<i>T</i>	10 s.
<i>R_{add}</i>	0,0 ohm.
<i>R_{app}</i>	1040 ohms.
<i>UI</i>	5,3 v.-a.
<i>UIT</i>	53 j.

» *Cœur* : augmentation brusque de la pression sanguine, au moment de la fermeture du courant; diminution progressive avec mouvements lents et de grande amplitude, pendant la durée du passage du courant; la pression tombe au-dessous de sa valeur primitive et remonte ensuite progressivement.

» *Respiration* : les mouvements respiratoires continuent pendant 4 à 5 secondes après la fermeture du courant, puis s'arrêtent; ils reprennent très violents à l'ouverture du circuit et diminuent ensuite progressivement.

» L'animal se rétablit.

» *Deuxième application de la tension* (3 minutes 30 secondes

plus tard) : mêmes conditions que précédemment, sauf $T = 20$ secondes (*Pl. XXIII*).

U	73 v.
I	0,080 a.
T	20 s.
R_{app}	912 ohms.
UI	5,8 v.-a.
UIT	116 j.

» *Cœur et respiration* : les mouvements s'arrêtent dès la fermeture du circuit. Mort. Tractions rythmées de la langue, sans résultat.

28. CHIEN PESANT 8,1 kg. *Sans aucune préparation.*

» *Électrodes* : patte antérieure gauche et patte postérieure droite.

» *Courant alternatif* : fréquence, 21 p : s.

U	76 v.
I	0,088 a.
T	10 s.
R_{add}	0,0 ohm.
R_{app}	860 ohms.
UI	6,68 v.-a.
UIT	66,8 j.

» Mort; tractions rythmées de la langue sans résultat.

29. CHIEN PESANT 11,5 kg. *Chloralose.*

» *Électrodes* : patte antérieure gauche et patte postérieure droite.

» *Courant alternatif* : fréquence, 12,5 p : s. (*Pl. XXIV*).

U	78 v.
I	0,113 a.
T	12 s.
R_{add}	0,0 ohm.
R_{app}	690 ohms.
UI	8,8 v.-a.
UIT	105 j.

» *Cœur* : arrêt du cœur dès la fermeture du circuit.

» *Respiration* : les mouvements respiratoires sont presque nuls, pendant le passage du courant; ils reprennent ensuite très hale-

tants, à l'ouverture du circuit; ils durent environ 20 secondes et s'arrêtent.

» Tractions rythmées de la langue sans résultat.

30. CHIEN PESANT 11 kg. *Sans aucune préparation.*

» *Électrodes* : patte antérieure gauche et patte postérieure droite.

» *Courant alternatif* : fréquence, 12,5 p : s.

» *Première application de la tension* :

<i>U</i>	79 v.
<i>I</i>	0,091 a.
<i>T</i>	10 s.
<i>R_{add}</i>	0,0 ohm.
<i>R_{app}</i>	868 ohms.
<i>UI</i>	7,2 v.-a.
<i>UIT</i>	72 j.

» Mouvements convulsifs. Cœur irrégulier. L'animal se rétablit.

» *Deuxième application de la tension* (5 minutes plus tard) :

» Même montage que précédemment. Fréquence, 12,5 p : s.

<i>U</i>	80 v.
<i>I</i>	0,103 a.
<i>T</i>	20 s.
<i>R_{add}</i>	0,0 ohm.
<i>R_{app}</i>	776 ohms.
<i>UI</i>	8,2 v.-a.
<i>UIT</i>	164 j.

» L'animal se rétablit.

» *Troisième application de la tension* (17 minutes plus tard) :

» Même montage que précédemment. Fréquence, 16 p : s.

<i>U</i>	105 v.
<i>I</i>	0,148 a.
<i>T</i>	10 s.
<i>R_{add}</i>	0,0 ohm.
<i>R_{app}</i>	700 ohms.
<i>UI</i>	15,5 v.-a.
<i>UIT</i>	155 j.

» Mort.

31. CHIENNE PLEINE PESANT 19,5 kg. *Sans aucune préparation.*

» *Électrodes* : patte antérieure gauche et patte postérieure droite.

Courant alternatif : fréquence, 12,5 p : s.

<i>U</i>	102 v.
<i>I</i>	0,226 s.
<i>T</i>	11 s.
<i>R_{add}</i>	0,0 ohm.
<i>R_{app}</i>	450 ohms.
<i>UI</i>	23 v.-a.
<i>UIT</i>	253 j.

» Mort. Tractions rythmées de la langue sans résultat.

32. CHIEN PESANT 13 kg. *Sans aucune préparation.*

» *Électrodes* : patte antérieure gauche et patte postérieure droite.

» *Courant alternatif* : fréquence, 13 p : s.

» *Première application de la tension* :

<i>U</i>	82 v.
<i>I</i>	0,125 a.
<i>T</i>	10 s.
<i>R_{add}</i>	0,0 ohm.
<i>R_{app}</i>	657 ohms.
<i>UI</i>	10,2 v.-a.
<i>UIT</i>	102 j.

» La respiration et les mouvements du cœur se ralentissent.

» *Deuxième application de la tension* (5 minutes plus tard) :

<i>U</i>	83 v.
<i>I</i>	0,132 a.
<i>T</i>	20 s.
<i>R_{add}</i>	0,0 ohm.
<i>R_{app}</i>	628 ohms.
<i>UI</i>	10,9 v.-a.
<i>UIT</i>	219 j.

» Mort. Arrêt de la respiration. Trémulations fibrillaires du cœur. Tractions rythmées de la langue sans résultat.

33. CHIEN PESANT 13 kg. *Sans aucune préparation.*

- » *Électrodes* : patte antérieure gauche et patte postérieure droite.
- » *Courant alternatif* : fréquence, 13 p : s.
- » *Première application de la tension* :

<i>U</i>	69 v.
<i>I</i>	0,079 a.
<i>T</i>	10 s.
<i>R_{add}</i>	0,0 ohm.
<i>R_{app}</i>	873 ohms.
<i>UI</i>	5,45 v.-a.
<i>UIT</i>	54 j.

- » L'animal se rétablit très vite.

- » *Deuxième application de la tension* (5 minutes plus tard) :

<i>U</i>	80 v.
<i>I</i>	0,102 a.
<i>T</i>	10 s.
<i>R_{add}</i>	0,0 ohm.
<i>R_{app}</i>	785 ohms.
<i>UI</i>	8,1 v.-a.
<i>UIT</i>	81 j.

- » L'animal se rétablit.

- » *Troisième application de la tension* (5 minutes plus tard) :

<i>U</i>	80 v.
<i>I</i>	0,102 a.
<i>T</i>	20 s.
<i>R_{add}</i>	0,0 ohm.
<i>R_{app}</i>	785 ohms.
<i>UI</i>	8,1 v.-a.
<i>UIT</i>	81 j.

- » Mort. La mort paraît s'être produite 15 secondes environ après la fermeture du circuit.

34. CHIEN PESANT 29,5 kg. *Sans aucune préparation.*

- » *Électrodes* : patte antérieure gauche et patte postérieure droite.

» *Courant alternatif* : fréquence, 75 p : s.

U	68 v.
I	0,160 a.
T	10 s.
R_{add}	0,0 ohm.
R_{app}	425 ohms.
UI	10,8 v.-a.
UIT	108 j.

» Mort. Trémulations fibrillaires du cœur.

35. CHIEN PESANT 16 kg. *Sans aucune préparation.*

» *Électrodes* : patte antérieure gauche et patte postérieure droite.

» *Courant alternatif* : fréquence, 75 p : s.

» *Première application de la tension* :

U'	146 v.
U	27 v.
I	0,068 a.
T	10 s.
R_{add}	1750 ohms.
R_{app}	397 ohms.
UI	1,8 a.-v.
UIT	18 j.

» L'animal se rétablit de suite.

» *Deuxième application de la tension* (5 minutes plus tard) :

U'	146 v.
U	25 v.
I	0,069 a.
T	20 s.
R_{add}	1750 ohms.
R_{app}	362 ohms.
UI	1,7 v.-a.
UIT	34 j.

» L'animal se rétablit.

» *Troisième application de la tension* (13 minutes plus tard) :

U'	114 v.
U	43 v.
I	0,072 a.
T	10 s.
R_{add}	997 ohms.
R_{app}	597 ohms.
UI	3,1 v.-a.
UIT	31 j.

» L'animal se rétablit.

» *Quatrième application de la tension* (2 minutes plus tard) :

U'	114 v.
U	42 v.
I	0,072 a.
T	20 s.
R_{add}	997 ohms.
R_{app}	584 ohms.
UI	3 v.-a.
UIT	60 j.

» L'animal se rétablit.

» *Cinquième application de la tension* (3 minutes plus tard) :

U'	150 v.
U	54 v.
I	0,096 a.
T	10 s.
R_{add}	997 ohms.
R_{app}	562 ohms.
UI	5,2 v.-a.
UIT	52 j.

» Mort. Trémulations fibrillaires du cœur.

36. CHIEN PESANT 18,5 kg. *Sans aucune préparation.*

» *Électrodes* : patte antérieure droite et patte postérieure gauche.

» *Courant alternatif* : fréquence, 75 p : s.

» *Première application de la tension :*

U'	115 v.
U	49 v.
I	0,065 a.
T	10 s.
R_{add}	750 ohms.
R_{app}	753 ohms.
UI	3,1 v.-a.
UIT	31 j.

» L'animal se rétablit.

» *Deuxième application de la tension (4 minutes plus tard) :*

U'	115 v.
U	44 v.
I	0,070 a.
T	20 s.
R_{add}	997 ohms.
R_{app}	628 ohms.
UI	3,08 v.-a.
UIT	61,6 j.

» L'animal se rétablit.

» *Troisième application de la tension (4 minutes plus tard) :*

U'	149 v.
U	53 v.
I	0,096 a.
T	10 s.
R_{add}	997 ohms.
R_{app}	552 ohms.
UI	5,1 v.-a.
UIT	51 j.

» L'animal se rétablit.

» *Quatrième application de la tension (2 minutes plus tard) :*

U'	149 v.
U	53 v.
I	0,097 a.
T	20 s.
R_{add}	997 ohms.
R_{app}	537 ohms.
UI	5,1 v.-a.
UIT	102 j.

» L'animal se rétablit.

» *Cinquième application de la tension* (12 minutes plus tard) :

» Fréquence, 14 p : s.

U'	115 v.
U	41 v.
I	0,075 a.
T	10 s.
R_{add}	997 ohms.
R_{app}	547 ohms.
UI	3,07 v.-a.
UIT	30,7 j.

» L'animal se rétablit.

» *Sixième application de la tension* (4 minutes plus tard) :

» Fréquence, 16 p : s.

U'	115 v.
U	41 v.
I	0,075 a.
T	20 s.
R_{add}	997 ohms.
R_{app}	547 ohms.
UI	3,07 v.-a.
UIT	61,4 j.

» L'animal se rétablit.

» *Septième application de la tension* (3 minutes plus tard) :

» Fréquence, 13 p : s.

U'	145 v.
U	45 v.
I	0,10 a.
T	20 s.
R_{add}	997 ohms.
R_{app}	450 ohms.
UI	4,5 v.-a.
UIT	90 j.

» L'animal se rétablit.

» *Huitième application de la tension* (3 minutes plus tard) :

» Fréquence, 13 p : s.

U'	144 v.
U	58 v.
I	0,115 a.
T	20 s.
R_{add}	746 ohms.
R_{app}	504 ohms.
UI	6,67 v.-a.
UIT	133 j.

» Mort. Trémulations fibrillaires du cœur.

37. CHIEN PESANT 13 kg. *Sans aucune préparation.*

» *Électrodes* : patte antérieure gauche et patte postérieure droite.

» *Courant alternatif* : fréquence, 11,5 p : s.

» *Première application de la tension* :

U'	142 v.
U	63 v.
I	0,088 a.
T	30 s.
R_{add}	900 ohms.
R_{app}	715 ohms.
UI	5,54 v.-a.
UIT	166 j.

» L'animal se rétablit.

» *Deuxième application de la tension* (45 minutes plus tard) :

» Fréquence, 42 p : s (Secteur de la Rive gauche).

U'	117 v.
U	56 v.
I	0,094 a.
T	45 s.
R_{add}	651 ohms.
R_{app}	596 ohms.
UI	5,27 v.-a.
UIT	237 j.

» Mort. Trémulations fibrillaires du cœur.

38. CHIEN PESANT 23 kg. *Sans aucune préparation.*

» *Électrodes* : patte antérieure gauche et patte postérieure droite.

» *Courant alternatif* : fréquence, 74,5 p : s.

» *Première application de la tension :*

U'	144 v.
U	56 v.
I	0,098 a.
T	30 s.
R_{add}	905 ohms.
R_{app}	572 ohms.
UI	5,48 v.-a.
UIT	164 j.

» L'animal se rétablit.

» *Deuxième application de la tension (3 minutes plus tard) :*

U'	145 v.
U	55 v.
I	0,10 a.
T	60 s.
R_{add}	900 ohms.
R_{app}	550 ohms.
UI	5,5 v.-a.
UIT	330 j.

» L'animal se rétablit.

» *Troisième application de la tension (10 minutes plus tard) :*

U'	142 v.
U	52 v.
I	0,102 a.
T	60 s.
R_{add}	900 ohms.
R_{app}	510 ohms.
UI	5,3 v.-a.
UIT	318 j.

» L'animal se rétablit.

» *Quatrième application de la tension (10 minutes plus tard) :*

U'	115 v.
U	41 v.
I	0,81 s.
T	60 a.
R_{add}	900 ohms.
R_{app}	507 ohms.
UI	3,32 v.-a.
UIT	198 j.

» L'animal se rétablit.

» *Cinquième application de la tension* (3 minutes plus tard) :

U'	113 v.
U	47 v.
I	0,10 a.
T	60 s.
R_{add}	650 ohms.
R_{app}	470 ohms.
UI	4,7 v.-a.
UIT	282 j.

» L'animal se rétablit. Il a commencé à respirer environ 30 secondes après le commencement du passage du courant.

» *Sixième application de la tension* :

U'	113 v.
U	110 v.
I	0,293 a.
T	38 s.
R_{add}	8 ohms.
R_{app}	375 ohms.
UI	32,2 v.-a.
UIT	1225 j.

» Mort. Trémulations fibrillaires.

39. CHIEN PESANT 17,5 kg. *Chloralosé*.

» *Électrodes* : patte antérieure gauche et patte postérieure droite.

» *Courant continu* fourni par des accumulateurs (*Pl. XXIV*).

U	372 v.
I	1,32 a.
T	10 s.
R_{add}	0,0 ohm.
R_{app}	282 ohms.
UI	492 v.-a.
UIT	4920 j.

» *Cœur* : arrêt immédiat.

» *Respiration* : arrêt des mouvements respiratoires, pendant la durée du passage du courant; mouvements, pendant une vingtaine de secondes après l'ouverture du circuit.

» Mort. Trémulations fibrillaires du cœur.

40. CHIEN PESANT 16,1 kg. *Chloralosé.*

- » *Électrodes* : patte antérieure gauche et patte postérieure droite.
- » *Courant continu* fourni par des accumulateurs (*Pl. XXIV*).

<i>U</i>	210 v.
<i>I</i>	0,750 a.
<i>T</i>	10 s.
<i>R_{add}</i>	0,0 ohm.
<i>R_{app}</i>	280 ohms.
<i>UI</i>	157 v.-a.
<i>UIT</i>	1570 j.

- » *Cœur* : arrêt immédiat.
- » *Respiration* : arrêt des mouvements respiratoires, pendant la durée du passage du courant; les mouvements reprennent à l'ouverture du circuit et durent pendant une quarantaine de secondes.
- » *Mort*.

41. CHIEN PESANT 26 kg. *Chloralosé.*

- » *Électrodes* : patte antérieure gauche et patte postérieure droite.
- » *Courant continu* fourni par des accumulateurs.
- » *Première application de la tension* (*Pl. XXV*) :

<i>U</i>	115 v.
<i>I</i>	0,245 a.
<i>T</i>	10 s.
<i>R_{add}</i>	0,0 ohm.
<i>R_{app}</i>	469 ohms.
<i>UI</i>	28,2 v.-a.
<i>UIT</i>	282 j.

- » *Cœur* : brusque augmentation de la pression sanguine, au moment de la fermeture du circuit; les mouvements continuent affaiblis, pendant le passage du courant; chute de pression très brusque et très forte après l'ouverture du circuit; les mouvements deviennent ensuite presque imperceptibles, pendant environ 30 secondes, tandis que la pression remonte peu à peu avec des oscillations; les mouvements se rétablissent ensuite progressivement.
- » *Respiration* : la respiration n'est pas suspendue, pendant le pas-

sage du courant, les mouvements sont au contraire très violents et haletants; ils se rétablissent ensuite progressivement.

» L'animal se rétablit.

» *Deuxième application de la tension* (6 minutes plus tard) :

<i>U</i>	133 v.
<i>I</i>	0,338 a.
<i>T</i>	10 s.
<i>R</i> _{add}	0,0 ohm.
<i>R</i> _{app}	396 ohms.
<i>UI</i>	45 v.-a.
<i>UIT</i>	450 j.

» *Cœur* : les mouvements du cœur ne sont pas arrêtés. Pas d'inscription sur le cylindre, la canule étant obturée par un caillot; elle a été changée d'artère pour l'expérience suivante.

» *Respiration* : la respiration est très faible, pendant le passage du courant, les mouvements reprennent ensuite très violents; ils se régularisent ensuite progressivement.

» L'animal se rétablit.

» *Troisième application de la tension* (18 minutes plus tard) :

<i>U</i>	149 v.
<i>I</i>	0,402 a.
<i>T</i>	10 s.
<i>R</i> _{add}	0,0 ohm.
<i>R</i> _{app}	372 ohms.
<i>UI</i>	60 v.-a.
<i>UIT</i>	600 j.

» Même allure générale des phénomènes que pour la première et la deuxième application de la tension.

» L'animal se rétablit.

» *Quatrième application de la tension* (19 minutes 5 secondes plus tard) :

<i>U</i>	149 v.
<i>I</i>	0,394 a.
<i>T</i>	10 s.
<i>R</i> _{add}	0,0 ohm.
<i>R</i> _{app}	378 ohms.
<i>UI</i>	58,7 v.-a.
<i>UIT</i>	587 v.

- » *Cœur* : arrêt immédiat au moment de la fermeture du circuit.
- » *Respiration* : les mouvements respiratoires sont arrêtés, pendant le passage du courant; ils reprennent ensuite pendant environ 25 secondes, puis s'arrêtent.
- » *Mort*. Trémulations fibrillaires du cœur.

42. CHIEN PESANT 17,5 kg. *Sans aucune préparation.*

- » *Électrodes* : patte antérieure gauche et patte postérieure droite.
- » L'animal a été soumis successivement à des tensions continues et alternatives (fréquence 42 p : s) afin de se rendre compte des valeurs de la résistance dans les deux cas. Les tensions ont été appliquées à quelques secondes d'intervalle. L'animal est mort à la deuxième application de la tension.

	Nature du courant.	Tension eff. Volts.	Courant eff. Amp.	Résistance. apparente. Ohms.
1 ^{re} application de la tension.....	alternatif	116	0,135	860
2 ^e — — — — —	continu	116	0,135	860
3 ^e — — — — —	alternatif	117	0,140	836
4 ^e — — — — —	continu	116	0,140	828
5 ^e — — — — —	alternatif	116	0,142	817
6 ^e — — — — —	continu	116	0,142	817
7 ^e — — — — —	alternatif	145	0,194	748

- » La résistance apparente est donc la même avec du courant continu et du courant alternatif, mais elle varie avec la durée du passage du courant et avec la tension.

43. CHIEN PESANT 10,5 kg. *Chloralosé.*

- » *Électrodes* : patte antérieure gauche et patte postérieure droite.
- » *Courant continu* fourni par des accumulateurs.
- » *Première application de la tension (Pl. XXVI)* :

<i>U</i>	146 v.
<i>I</i>	0,207 a.
<i>T</i>	10 s.
<i>R_{add}</i>	0,0 ohm.
<i>R_{app}</i>	705 ohms.
<i>UI</i>	30,2 v.-a.
<i>UIT</i>	302 j.

» *Cœur* : augmentation de la pression sanguine, au moment de la fermeture du circuit; variation de la pression; chute brusque, après l'ouverture du circuit, puis rétablissement progressif en 30 secondes environ. Les mouvements du cœur sont presque imperceptibles, pendant une quarantaine de secondes; ils se rétablissent ensuite peu à peu.

» *Respiration* : les mouvements respiratoires sont presque complètement suspendus, pendant toute la durée du passage du courant; ils se rétablissent ensuite progressivement.

» *Deuxième application de la tension* (3 minutes 5 secondes plus tard) :

<i>U</i>	162 v.
<i>I</i>	0,258 a.
<i>T</i>	10 s.
<i>R_{add}</i>	0,0 ohm.
<i>R_{app}</i>	628 ohms
<i>UI</i>	11,8 v.-a.
<i>UIT</i>	418 j.

» *Cœur et respiration* : l'allure générale des phénomènes est la même que dans le cas précédent, l'animal se rétablit.

» *Troisième application de la tension* (1 minute 5 secondes plus tard) :

<i>U</i>	194 v.
<i>I</i>	0,339 a.
<i>T</i>	10 s.
<i>R_{add}</i>	0,0 ohm.
<i>R_{app}</i>	572 ohms.
<i>UI</i>	65,8 v.-a.
<i>UIT</i>	658 j.

» *Mort*.

» *Cœur* : arrêt des mouvements après 3 battements violents.

» *Respiration* : la respiration est arrêtée, pendant le passage du courant, les mouvements reprennent ensuite irréguliers et s'arrêtent au bout d'une quarantaine de secondes.

44. CHIENNE PESANT 10 kg. *Sans aucune préparation.*

» *Électrodes* : patte antérieure gauche et patte postérieure droite.

» *Courant continu* fourni par des accumulateurs.

U	193 v.
I	0,495 a.
T	10 s.
R_{adw}	0,0 ohm.
R_{app}	390 ohms.
UI	95,5 v.-a.
UIT	955 j.

» L'animal a aboyé quelques secondes après l'ouverture du circuit.

» Mort. Trémulations fibrillaires du cœur.

» Traction rythmée de la langue sans succès.

» *Mesures de la résistance.* — 7 minutes plus tard, on a appliqué différentes tensions continues de façon à se rendre compte de la résistance du corps en fonction de la tension et de l'intensité du courant.

» On a obtenu les valeurs suivantes :

Tension.	Courant.	Résistance.
Volts	Amp.	Ohms
176.....	0,458	384
160.....	0,413	387
143.....	0,368	388
128.....	0,324	395
112.....	0,280	400
94.....	0,234	402
79.....	0,192	412
66.....	0,154	428
50.....	0,110	454
33.....	0,056	589
16.....	0,029	587

Les expériences de la deuxième série ont été résumées dans le Tableau suivant. Les abréviations employées pour désigner la place des électrodes sont les mêmes que précédemment.

Numéro de l'expé- rien. du chien.	Poids de l'animal.	Fréquence. Périodes par seconde.	Tension off. (volts)		Courant off. (amp.) <i>I</i> .	Temps. <i>m</i> .	Résistance (ohms)		<i>UI</i> Volt-amp.	<i>UIT</i> Joules.	Observations.
			entre élec- trodes <i>U</i> .	entre élec- trodes <i>U</i> .			addi- tionnelle <i>R_{add}</i> .	app- tionnelle <i>R_{app}</i> .			
25.	I 16,1	P _{Ag} -P _{pd}	100	100	0,141	0 10	—	710	14,1	141	Mort.
26.	I 6	P _{Ag} -P _{pd}	76	76	0,103	0 20	—	738	7,8	156	Mort (traction de la langue et respir. artif. sans résultat).
27.	I 9,7	P _{Ag} -P _{pd}	73	73	0,070	0 10	—	1040	5,3	53	Se rétablit.
	II 9,7	P _{Ag} -P _{pd}	73	73	0,080	0 20	—	912	5,8	116	Mort.
28.	I 8,1	P _{Ag} -P _{pd}	76	76	0,088	0 10	—	860	6,68	66,8	Mort (traction de la langue sans résultat).
29.	I 11,5	P _{Ag} -P _{pd}	78	78	0,113	0 12	—	690	8,8	105	Mort (traction de la langue sans résultat).
30.	I 11	P _{Ag} -P _{pd}	79	79	0,091	0 10	—	868	7,2	72	Se rétablit.
	II 11	P _{Ag} -P _{pd}	80	80	0,103	0 20	—	776	8,2	164	Se rétablit.
	III 11	P _{Ag} -P _{pd}	105	105	0,148	0 10	—	700	15,5	—	Mort.
31.	I 19,5	P _{Ag} -P _{pd}	102	102	0,226	0 11	—	450	23	253	Mort (traction de la langue sans résultat).
32.	I 13	P _{Ag} -P _{pd}	82	82	0,125	0 10	—	657	10,2	102	Se rétablit.
	II 13	P _{Ag} -P _{pd}	83	83	0,132	0 20	—	628	10,9	219	Mort (traction de la langue sans résultat).
33.	I 13	P _{Ag} -P _{pd}	69	69	0,079	0 10	—	873	5,45	54	Se rétablit très vite.
	II 13	P _{Ag} -P _{pd}	80	80	0,102	0 10	—	785	8,1	81	Se rétablit.
	III 13	P _{Ag} -P _{pd}	80	80	0,102	0 20	—	785	8,1	81	Mort (au bout de 15 secondes).
34.	I 29,5	P _{Ag} -P _{pd}	68	68	0,160	0 10	—	425	10,8	108	Mort. Cœur.

Numéro du l'expé- chion. rience, l'animal.	Poids de k	Électrodes.	Fréquence.		Tension eff. (volts)		Courant eff. (amp.)	Temps. m s	Résistance (ohms)		U Volt-amp.	U/I Joules.	Observations.
			Par seconde.	Par seconde.	U _t .	U _e .	I.		R _{add.}	R _{app.}			
35.	I	P _{ag} -P _{pd}	75		146	27	0,068	0 10	1750	397	1,8	18	Se rétablit de suite.
	II	P _{ag} -P _{pd}			146	25	0,069	0 20	1750	362	1,7	34	Se rétablit.
	III	P _{ag} -P _{pd}			114	43	0,072	0 10	997	597	3,1	31	Se rétablit.
	IV	P _{ag} -P _{pd}			114	42	0,072	0 20	997	584	3	60	Se rétablit.
	V	P _{ag} -P _{pd}			150	54	0,096	0 10	997	562	5,2	52	Mort. Cœur.
36.	I	P _{ad} -P _{pg}	75		115	49	0,065	0 10	750	733	3,1	31	Se rétablit.
	II	P _{ad} -P _{pg}	75		115	44	0,070	0 20	997	628	3,08	61,6	Se rétablit.
	III	P _{ad} -P _{pg}	75		149	53	0,096	0 10	997	552	5,1	51	Se rétablit.
	IV	P _{ad} -P _{pg}	75		149	53	0,097	0 20	997	537	5,1	102	Se rétablit.
	V	P _{ad} -P _{pg}	14		115	41	0,075	0 10	997	547	3,07	30,7	Se rétablit.
	VI	P _{ad} -P _{pg}	16		115	41	0,075	0 20	997	547	3,07	61,4	Se rétablit.
	VII	P _{ad} -P _{pg}	13		145	45	0,100	0 20	997	450	4,5	90	Se rétablit.
	VIII	P _{ad} -P _{pg}	13		144	58	0,115	0 20	746	504	6,67	133	Mort. Cœur.
37.	I	P _{ag} -P _{pd}	11,5		142	63	0,088	0 30	900	715	5,54	166	Se rétablit.
	II	P _{ag} -P _{pd}	42		117	56	0,094	0 45	651	596	5,27	237	Mort. Cœur.
38.	I	P _{ag} -P _{pd}	74,5		144	46	0,098	0 30	905	572	5,48	164	Se rétablit.
	II	P _{ag} -P _{pd}	74,5		145	55	0,100	0 60	900	550	5,5	330	Se rétablit.
	III	P _{ag} -P _{pd}	74,5		142	52	0,102	0 60	900	510	5,3	318	Se rétablit.
	IV	P _{ag} -P _{pd}	74,5		115	41	0,810	0 60	900	507	3,32	198	Se rétablit.
	V	P _{ag} -P _{pd}	74,5		113	47	0,100	0 60	650	470	4,7	282	Se rétablit.
	VI	P _{ag} -P _{pd}	74,5		113	110	0,293	0 38	—	375	32,2	1225	Mort. Cœur.

N ^o du chien.	Poids de l'expé- rience.	Électrodes.	Nature du courant.	Tension eff. (volts)		Courant eff. (amp.)	Résistance (ohms)		U Volt-amp.	UIT Joules.	Observations.
				entre élec- trodes totale U ^{''} .	entre élec- trodes U ^{''} .		Temp. I.	addi- tionnelle R _{add} .			
39.	I	P _{ag} -P _{pd}	Continu	—	37,2	1,32	0 10	—	282	4920	Mort. Cœur.
40.	I	P _{ag} -P _{pd}	Continu	—	210	0,75	0 10	—	280	157	Mort. Cœur.
41.	I	P _{ag} -P _{pd}	Continu	—	115	0,245	0 10	—	469	28,2	Se rétablit.
	II	P _{ag} -P _{pd}	Continu	—	133	0,338	0 10	—	396	15	Se rétablit.
	III	P _{ag} -P _{pd}	Continu	—	149	0,402	0 10	—	372	60	Se rétablit.
	IV	P _{ag} -P _{pd}	Continu	—	149	0,094	0 10	—	378	58,7	Mort. Cœur
42.	I	P _{ag} -P _{pd}	Altern.	—	116	0,135	0 3	—	860	—	Recherche de la résistance appa- rente par l'application succes- sive de tensions continues et des courants alternatifs.
	II	P _{ag} -P _{pd}	Continu	—	116	0,135	0 3	—	860	—	
	III	P _{ag} -P _{pd}	Altern.	—	117	0,140	0 3	—	836	—	
	IV	P _{ag} -P _{pd}	Continu	—	116	0,140	0 3	—	828	—	
	V	P _{ag} -P _{pd}	Altern.	—	116	0,142	0 3	—	817	—	
	VI	P _{ag} -P _{pd}	Continu	—	116	0,142	0 3	—	817	—	
	VII	P _{ag} -P _{pd}	Continu	—	145	0,191	0 3	—	748	—	
43.	I	P _{ag} -P _{pd}	Continu	—	146	0,207	0 10	—	705	33,2	Se rétablit.
	II	P _{ag} -P _{pd}	Continu	—	162	0,238	0 10	—	628	41,8	Se rétablit.
	III	P _{ag} -P _{pd}	Continu	—	194	0,339	0 10	—	572	65,8	Mort. Cœur.
44.	I	P _{ag} -P _{pd}	Continu	—	193	0,405	0 10	—	390	95,5	Mort. Cœur.

NOTA. — Le courant continu a été fourni par une batterie d'accumulateurs.

OBSERVATIONS DU RAPPORTEUR.

» Les conclusions pratiques à tirer des expériences résumées ci-contre, exécutées au début de l'année 1910 par votre Commission, présentent un intérêt tout particulier :

» En effet, toutes autres conditions restant égales, on constate que la fréquence, entre les limites de 12 à 75 périodes par seconde, ne joue aucun rôle dans le danger résultant d'un contact avec un conducteur électrique;

» Que, de plus, le courant alternatif est plus dangereux que le courant continu;

» Qu'enfin, la résistance du corps ne varie pas avec la nature du courant qui le traverse, à intensités égales.

» *Influence de la fréquence.* — Les expériences exécutées sur les chiens n^{os} 25 à 38 démontrent qu'aux fréquences industrielles, le danger du courant ne varie pas, si les autres conditions de l'expérience restent les mêmes.

» Le chien n^o 27 résiste dans la première expérience (10 secondes, 27 périodes et 0,070 ampère) et succombe dans la seconde (20 secondes, 27 périodes et 0,080 ampère); ce résultat, qui peut se résumer en disant que l'animal a résisté à 53 joules et a succombé sous l'action de 116 joules, est en tous points comparable au résultat des premières expériences exécutées en 1909 avec du courant à 42 périodes.

» Le chien n^o 23 succombe sous l'action de 141 joules (75 périodes).

» Le chien n^o 30, expérience III, succombe sous l'action de 164 joules, 16 périodes, dans des conditions d'application des électrodes, de temps et d'intensité assez identiques; seule la fréquence avait notablement varié.

» Le chien n^o 35 résiste à des intensités variant entre 0,065 et 0,100 ampère, quelle que soit la valeur de la fréquence qu'on a pu faire varier entre 13 et 75 périodes par seconde, sans modifier le résultat final.

» La mort de cet animal ne survient qu'au moment où l'intensité atteint 0,115 ampère.

» Le chien n° 37 semble, au premier examen, faire exception à la règle. Cet animal résiste au courant à la fréquence de 11,5 périodes et succombe par le fait d'un courant à la fréquence de 42 périodes; mais on peut admettre dans ce cas, sans crainte d'erreur, que la mort est le résultat de la durée de passage du courant considéré, qui a été appliqué pendant 45 secondes dans la deuxième expérience au lieu de 30 secondes dans la première.

» Enfin, le chien n° 38, soumis à l'action d'un courant de fréquence relativement élevée, au point de vue industriel, se comporte exactement comme l'avaient fait les animaux soumis aux premières expériences de 1909 et ne meurt qu'en raison de la valeur très élevée (1225 joules) de l'énergie qui passe à travers son corps.

» *Comparaison des résultats produits par le courant alternatif et le courant continu.* — Le courant continu (courant fourni par des accumulateurs) paraît moins dangereux que le courant alternatif; nous remarquerons le chien n° 41, expériences I, II, III, qui résiste à trois applications successives (intensités de 0,242, 0,338 et 0,402 ampère) et succombe enfin à la quatrième application (0,394 ampère).

» Le chien n° 43 supporte sans inconvénient grave des intensités de 0,207 et 0,258 ampère qui auraient été mortelles avec du courant alternatif; il ne succombe qu'à 0,339 ampère.

» Sans être très absolu, on peut admettre que les chiens succombent lorsque l'intensité va atteindre $\frac{1}{10}$ d'ampère, lorsque le courant est alternatif; tandis que la mort ne survient que pour des intensités supérieures à $\frac{3}{10}$ d'ampère lorsque le courant est continu (expériences : chien 41, III; chien 43, III, et chien 44).

» *De la résistance du corps.* — Les résultats des expériences I à VII exécutées sur le chien n° 42 montrent que la résistance apparente du corps est indépendante de la nature du courant, il importe peu qu'il soit alternatif ou continu.

» Plusieurs passages successifs du courant n'ont pas un effet très sensible sur la valeur de cette résistance.

NOTE SUR UN VÊTEMENT PROTECTEUR contre les effets physiologiques des courants électriques

» M. N. Artémiéff, Directeur de l'Institut électrotechnique de Kiew (Russie), a inventé et fait breveter un vêtement protecteur contre les effets des courants électriques à haute tension. Ce vêtement était primitivement destiné à protéger les étudiants dans les laboratoires. Des essais et expériences faites par l'inventeur lui-même ont démontré que ce vêtement pourrait également rendre de grands services dans la pratique, pour les installations à haute tension.

» Ce vêtement se compose d'un tissu métallique très fin et très souple, formant une seule pièce et enveloppant le corps, y compris la tête, les mains et les pieds. Afin de le rendre plus solide, le tissu métallique est fixé sur de la toile fine; il se porte par dessus les vêtements ordinaires et il est fait de telle façon qu'on peut le revêtir sans aide. Les fentes nécessaires ne diminuent nullement son efficacité pourvu qu'elles soient fermées selon les prescriptions. Ce vêtement n'apporte pas de gêne sensible, ni pour voir, ni pour travailler.

» Son effet protecteur est de deux sortes :

» 1^o Le corps de l'opérateur est mis en court circuit par le vêtement protecteur. Entre deux points du corps, il ne peut pas se produire de différences de tensions dangereuses. La résistance du vêtement est inférieure à 0,01 ohm; celle du corps humain, par contre, est plus grande que 2000 ohms ⁽¹⁾, mesurée dans les deux cas, de main à main. En admettant ces valeurs limites, on n'obtiendrait, en cas d'un court circuit de 1000 ampères, qu'une tension de 100 volts d'une main à l'autre, et le courant dérivé qui traverserait le corps ne serait que de 0,005 ampère et, par conséquent, absolument inoffensif. Mais en tenant compte de l'échauffement du tissu métallique, dû au passage du courant, il faudra rester au-dessous de cette valeur de 1000 ampères, car le vêtement peut supporter 200 ampères environ d'une façon continue, et 600 ampères environ pendant quelques secondes.

» 2^o Le vêtement protecteur empêche, en outre, que des courants de charge pénètrent dans le corps humain. Un homme revêtu de cette enveloppe peut, par conséquent, toucher sans danger n'importe quel point d'une installation à haute tension, à condition, toutefois, que celle-ci soit bien isolée; si l'installation n'est pas bien isolée, on peut néanmoins toucher les appareils si l'on est soi-même bien isolé, soit sur une plaque en ébonite, soit sur une plaque en bois reposant sur des isolateurs en porcelaine. Des essais ont été faits dans ce sens sous des tensions jusqu'à 2000 volts.

» Dans les deux cas, on suppose naturellement qu'on ne relie pas en même temps

(1) Ces valeurs ont été reproduites comme mémoire; nous en laissons toute la responsabilité à l'inventeur. (*Note du rapporteur.*)

des pôles de sens contraire; car autrement il ne s'agirait plus d'un faible courant de charge, mais d'un court circuit plus ou moins puissant avec formation d'arc, cas dont nous allons parler ci-après. L'enveloppe métallique protège contre le danger de mort en cas de hautes tensions, puisqu'elle ne laisse pas pénétrer de courant dangereux dans le corps; par contre, elle ne sera pas toujours un préservatif certain au point de vue des lésions, notamment des brûlures qui peuvent survenir en cas de court circuit. Aussi longtemps que le contact subsiste entre l'enveloppe et le conducteur, il n'y a pas de danger, même en cas de court circuit ou de contact avec un réseau de haute capacité, pourvu que le courant du court circuit ou de charge ne dépasse pas les limites indiquées plus haut (200 ampères d'une façon continue, 600 ampères pendant quelques secondes). Si, par suite de l'intensité élevée, les plombs fusibles fondent ou les interrupteurs automatiques sautent avant que l'opérateur ait supprimé son contact, son enveloppe reste intacte ainsi que lui-même. Par contre, si les plombs fusibles résistent ou si les interrupteurs automatiques ne fonctionnent pas et si l'opérateur interrompt le courant avant que le courant n'ait été coupé, il se produira un arc qui pourra détruire le tissu et occasionner des brûlures.

» M. Artémiéff a mis avec ses deux mains une machine de 1000 volts et 200 ampères en court circuit; puis il a brusquement interrompu le circuit avec une main; il s'est produit un arc très considérable et le tissu du gant a été brûlé en différents endroits, mais la main n'a pas été lésée du tout. M. Artémiéff a également pu toucher, sans détériorer son vêtement, un conducteur, et même les deux à la fois, d'un transformateur de 20 kilowatts de faible intensité sous une tension de 150000 volts et plus.

» On peut, d'une façon générale, distinguer trois cas en ce qui concerne l'emploi du vêtement protecteur :

» 1^o L'installation (machines ou transformateurs) est si petite que, même en cas de courts circuits, il ne se produit que de faibles courants (1 à 2 ampères).

» Le vêtement protecteur n'est détérioré, dans ce cas, en aucune façon; la personne qui le porte peut travailler sans le moindre danger et se mouvoir comme s'il n'y avait pas de haute tension.

» 2^o L'installation est telle qu'en cas de court circuit entre les deux pôles, ou en cas de contact avec l'un des pôles d'un réseau à grande capacité, il se produit des courants de 2 à 30 ampères environ. L'arc qui jaillit peut détruire par endroits le tissu métallique, mais sur de petites étendues seulement. Par contre, la toile sur laquelle est fixée le tissu n'est pas attaquée et le porteur du vêtement reste indemne.

» 3^o En cas de courts circuits plus puissants, le vêtement est détruit à l'endroit où se produit l'arc et le porteur peut recevoir des brûlures. Dans les installations de cette importance, il a lieu d'être très prudent. L'efficacité du vêtement protecteur doit, dans ce cas, être envisagé de la façon suivante : la personne qui se serait exposée à la haute tension, sans le vêtement, aurait été tuée, tandis que revêtue de l'enveloppe, elle ne serait vraisemblablement pas foudroyée, mais pourrait toutefois recevoir des brûlures plus ou moins graves.

» L'intensité admissible des courts circuits dépend naturellement aussi du tissu et de la durée de l'arc. Les intensités indiquées plus haut s'entendent pour les vêtements actuellement en fabrication, à condition que l'arc ne persiste que peu de temps à un même endroit. L'interruption du courant se fera d'ailleurs, dans la plupart des cas, involontairement et très rapidement. Le phénomène des crispations dans la main quand on touche un conducteur ne se produit pas, dit-on. Le vêtement protecteur peut non seulement s'employer dans les laboratoires pour les essais à haute tension et faibles intensités, mais il pourra également rendre des services dans la pratique des installations à haute tension; il est, en tout cas, préférable aux gants et aux souliers en caoutchouc; plus la tension est élevée, moins l'emploi de ces derniers est peu pratique et plus, au contraire, le tissu métallique pourra être efficace. Il permet, si l'on évite que les arcs ne se produisent sur le vêtement, de procéder à des travaux sur la ligne sans trop de danger, son emploi semble être indiqué comme procédé de sauvetage pour préserver le sauveteur.

» En cas d'incendie dans une station centrale à haute tension, par exemple, il permettra à la personne qui dirige la lance de la conduite d'eau, si elle est revêtue de l'enveloppe protectrice, de s'approcher à volonté du foyer d'incendie, sans risquer qu'un courant d'une ligne, qui pourrait être sous haute pression, ne passe à travers le jet d'eau dans son corps. »



**NOTE AU SUJET DU DANGER SPÉCIAL DES COURANTS ALTERNATIFS
PROVENANT DE LA CAPACITÉ.**

Par M. GUÉRY.

« Les recherches dont M. le Dr Weiss a rendu compte, dans sa très intéressante Communication, présentent un intérêt tout particulier qui sera vivement apprécié de tous les électriciens. Je voudrais, à ce sujet, signaler particulièrement le danger spécial que présentent les courants alternatifs par suite des effets de capacité.

» Aujourd'hui, par suite du développement rapide des distributions d'énergie électrique et peut-être bien pour une large part de l'attrait de la nouveauté, tout le monde est plus ou moins électricien.

» L'électricité industrielle figure même dans le programme du baccalauréat, où je vois, non sans crainte d'ailleurs pour la formation intellectuelle des jeunes gens, figurer les courants polyphasés.

» L'idée que le danger des courants n'existe que si l'on touche les deux conducteurs est certainement aujourd'hui très répandue dans le public. Or, cette idée est complètement fausse, même dans le cas d'un isolement parfait des lignes, si le corps n'est pas lui-même parfaitement isolé du sol. Cette considération est en général peu développée et c'est ce qui m'engage à transcrire textuellement un paragraphe emprunté à la rédaction écrite d'un cours que j'ai professé en 1905, en collaboration avec notre collègue M. Duval, à l'École spéciale de Travaux publics.

«On doit également attribuer à la capacité le danger particulier que présentent les courants alternatifs pour la sécurité des personnes qui ont à s'approcher des conducteurs.

» Sur une ligne à courant continu parfaitement isolée du sol, il n'y aurait aucun danger à toucher un seul conducteur de la ligne. Le corps ne serait, en effet, soumis à aucune différence de potentiel. Il n'en est pas de même avec une ligne à courants alternatifs.

» Il y a toujours danger à toucher un seul conducteur d'une ligne à courants alternatifs à haute tension; le danger est d'autant plus grand que la capacité de la ligne est plus grande.

» En effet, soit une ligne monophasée fonctionnant sous une tension E , et ayant, par rapport au sol, des capacités C pour chaque conducteur (fig. 1). Si un homme touche un des conducteurs A,

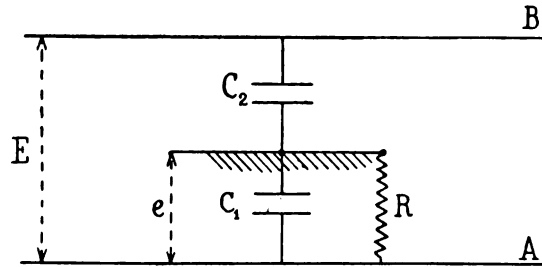


Fig. 1.

il shunte l'une de ces capacités par la résistance R de son corps; il est alors traversé par une partie du courant de capacité correspondant au conducteur B avec lequel il n'est pas en contact. Cherchons la valeur de la tension e à laquelle l'homme se trouve

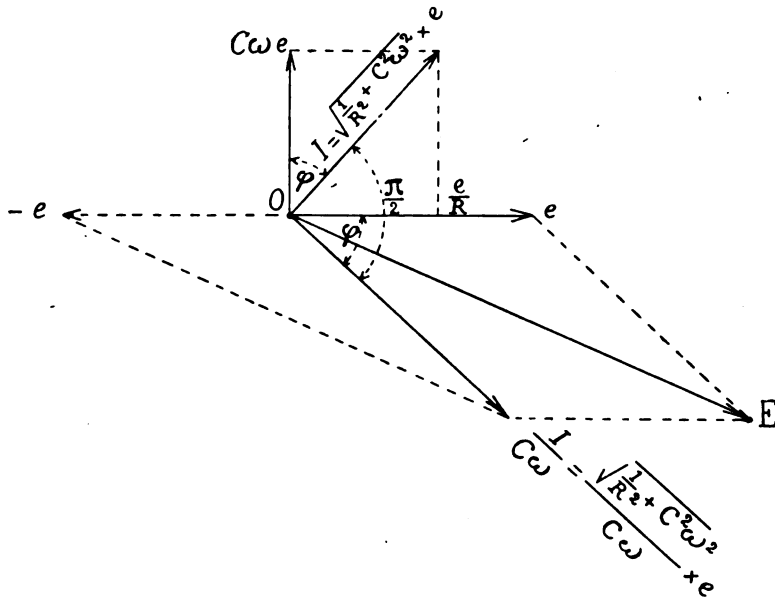


Fig. 2.

soumis, c'est-à-dire la différence de potentiel entre le sol et le conducteur A.

» Supposant e connu, nous pouvons tracer le diagramme de la figure 2.

» Le courant passant dans le condensateur C_1 est $C\omega e$ en avance de $\frac{\pi}{2}$ sur e . Le courant passant dans R est $\frac{e}{R}$ en phase avec e . Le

courant total I , qui passe dans C_2 , est donné par la composition de ces deux courants. Il donne lieu, aux bornes de C_2 , à une tension $\frac{I}{C\omega}$ en retard de $\frac{\pi}{2}$ sur I et qui, composée avec e , doit donner E .

» On déduit facilement de l'examen du diagramme

$$e = \frac{E}{\sqrt{4 + \frac{1}{R^2 C^2 \omega^2}}}$$

» La tension e , qui serait nulle pour une capacité nulle, est donc inférieure à $\frac{E}{2}$, mais elle se rapproche d'autant plus de cette valeur que la capacité est plus grande.

» Supposons, par exemple :

$$R = 10\,000 \text{ ohms.}$$

$$C = 5 \text{ microfarads.}$$

$$\omega = 314 \text{ (50 } \sim \text{).}$$

$$e = \frac{E}{\sqrt{4 + \frac{1}{(10\,000 \times 5 \times 10^{-6} \times 314)^2}}} = \frac{E}{\sqrt{4 + \frac{1}{(15,7)^2}}}$$

e ne diffère de $\frac{E}{2}$ que d'une quantité absolument négligeable.

» Donc, un homme touchant un conducteur d'un réseau monophasé à 10000 volts, s'expose à une tension de 5000 volts.

» On montrerait de même qu'en touchant un conducteur d'un réseau triphasé ayant une tension E entre fils, on s'expose à une tension $\frac{E}{\sqrt{3}}$.

» Il faut donc prendre les plus grandes précautions au voisinage des conducteurs à haute tension et retenir surtout qu'un bon isolement des installations par rapport au sol ne met pas le personnel à l'abri du danger. Partout où l'on peut avoir à s'approcher de conducteurs sous tension, il est bon de recouvrir le sol d'un tapis isolant... »

» J'ajouterai seulement une ou deux remarques à ce qui précède.

» Conservant la même tension de 10000 volts, je suppose seulement 1 km de câble en circuit, soit une capacité de 0,18 microfarad environ et je me place dans le cas de la fréquence 25, toutes conditions favorables à la réduction du danger signalé. J'admets

comme résistance du corps 1000 ohms seulement, ce qui suppose des contacts bien établis. Dans ces conditions, la tension e se réduit à 285 volts, chiffre encore dangereux d'après M. le Dr Weiss, dans les conditions de faible résistance du corps que nous avons admises.

» D'autre part, dans des installations de ce genre, si la résistance d'isolement des câbles était seule en jeu, il n'y aurait jamais de danger: car un câble dont la résistance d'isolement s'abaisserait à une valeur dangereuse serait bien près de claquer. D'autre part, une résistance d'isolement de 40 mégohms est facile à obtenir pour un tableau. Mettons en circuit 40 de ces tableaux, nous arrivons à une résistance d'isolement d'un mégohm, qui ne serait pas dangereuse s'il n'y avait pas de capacité, car mise en série avec le corps humain supposé d'une résistance de 1000 ohms, elle laisserait celui-ci soumis à une tension de 10 volts seulement.

» Nous pouvons donc dire que les conditions de bon fonctionnement des réseaux exigent des résistances d'isolement qui ne laissent subsister aucun danger provenant de dérivations par conductance.

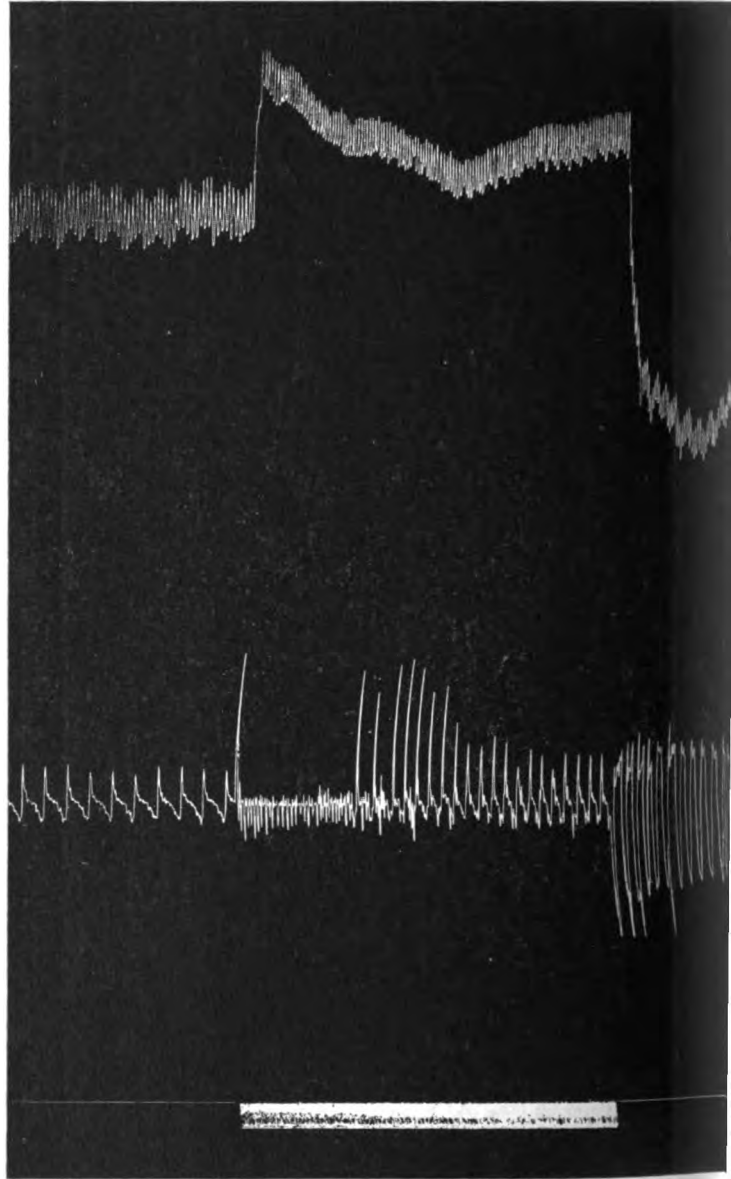
» Je crois qu'il serait très utile de bien faire pénétrer dans l'esprit du public instruit cette idée que le contact avec un seul conducteur est presque toujours dangereux, et c'est la raison pour laquelle je me suis permis de rappeler ces faits qui ne peuvent être ignorés des spécialistes que sont nos collègues.

» Je terminerai en citant une démonstration pratique de ce qui précède: elle m'a été fournie par un de mes anciens camarades de l'École supérieure d'Électricité qui, vers 1900, dirigeait un petit réseau de province à courants alternatifs à 2000 ou 3000 volts.

» Il avait remarqué qu'il pouvait toucher impunément une borne de ses machines quand elles n'étaient pas reliées au réseau, et qu'il n'en était plus de même quand les câbles armés souterrains étaient mis en circuit.

» D'abord surpris par ce phénomène, je n'avais pas tardé à l'attribuer à la capacité. Je n'engagerai personne à reproduire l'expérience de mon camarade, d'autant plus que les puissantes machines que l'on construit aujourd'hui peuvent bien avoir une capacité non négligeable. ».

1. Chien pesant 21,7 kg. Chloralosé. Électrodes : patte antérieure



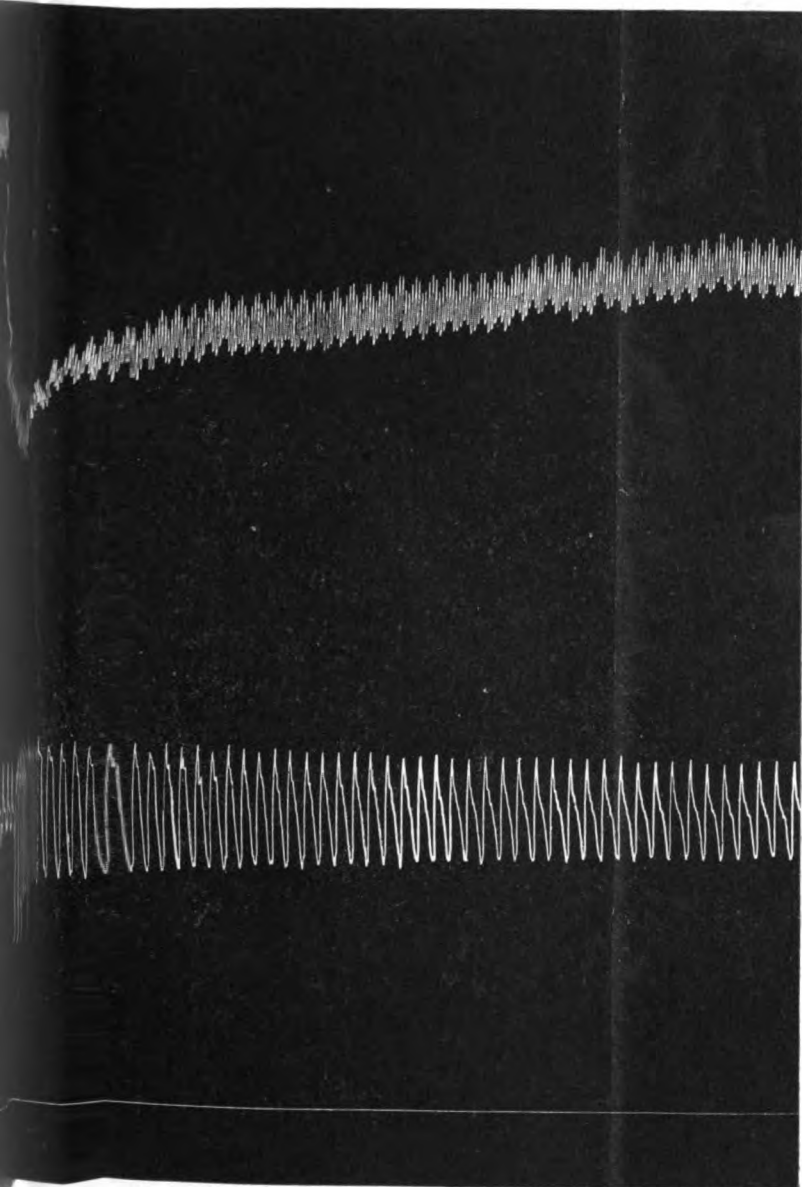
Première application de la tension :

$U = 42$ volts. $I_{eff} = 0,042$ ampère. $T = 50$ secondes. $R_{add} = 0,01$

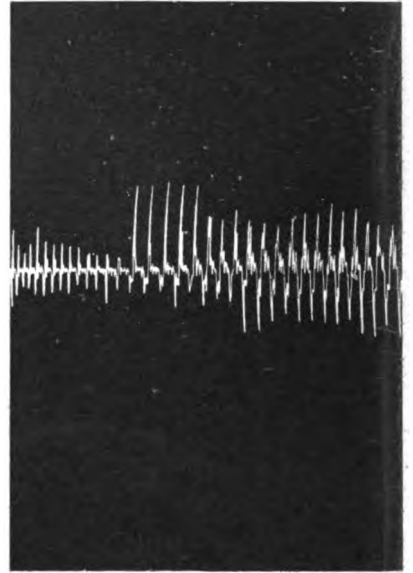
1925 Octobre 19 11.

Pl. I.

Patte droite et patte postérieure gauche. Courant alternatif : fréquence 43.

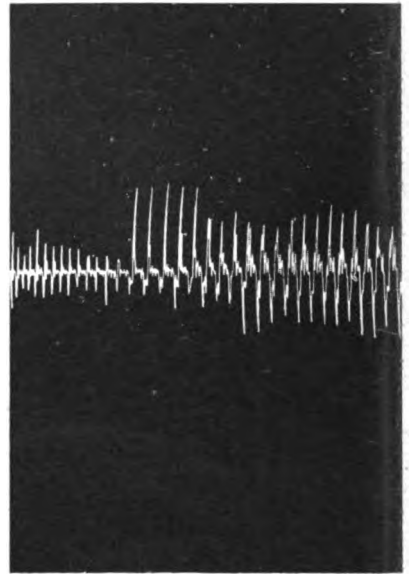


111.



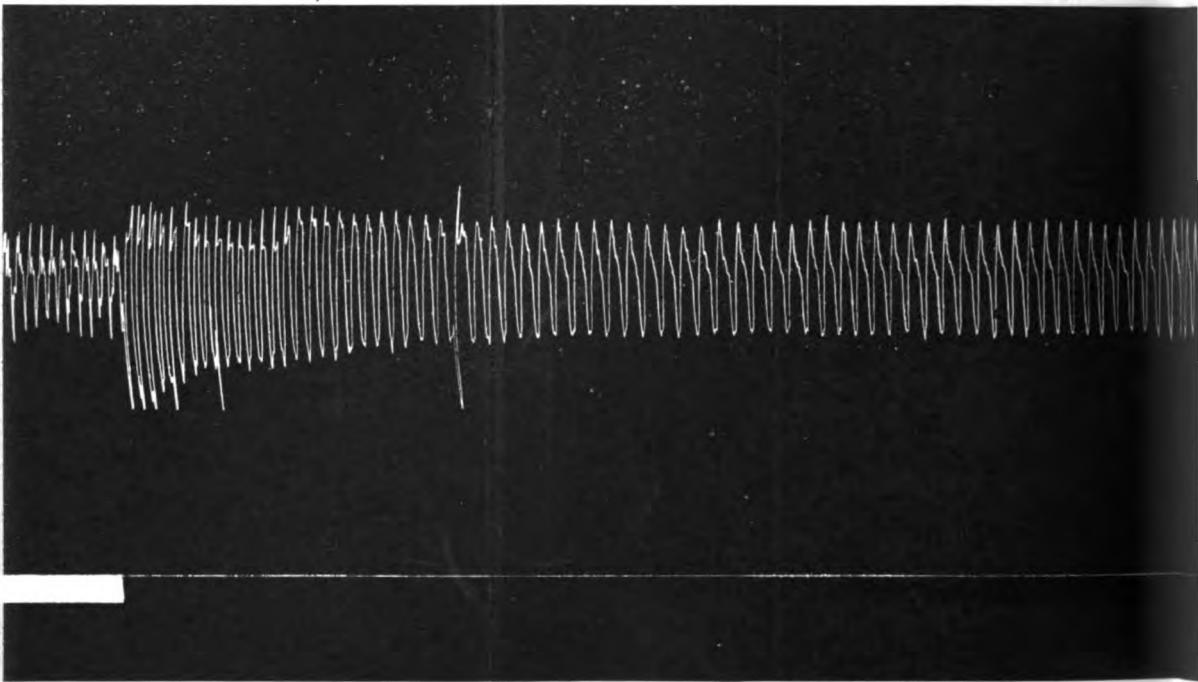
Deuxième application de la tensor

$U = 4$ volts. $I = 0,047$ ampère. $T = 68$
 $R_{add} = 0$ ohm.



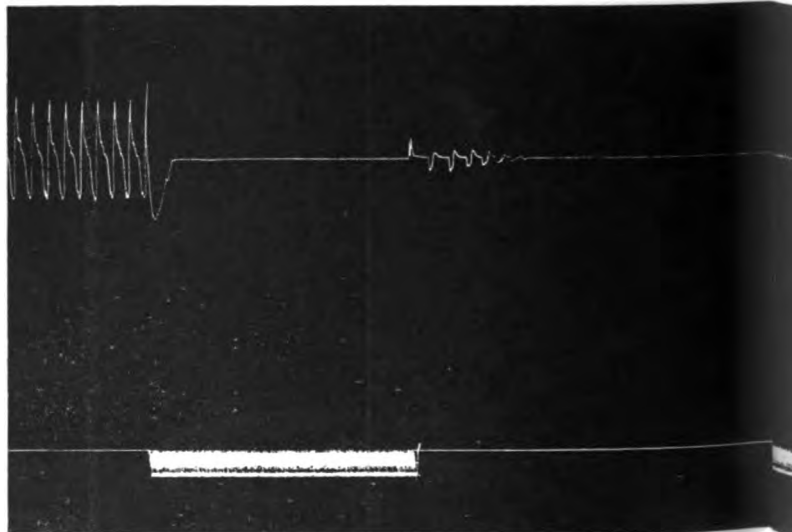
Deuxième application de la tension
 $U = 4$ volts. $I = 0,017$ ampère. $T = 68$
 $R_{add} = 0$ ohm.

1 (*suite*). Chien pesant 21,7 kg. Chloralosé. Electrodes : patte antérieure d



1 :
secondes.

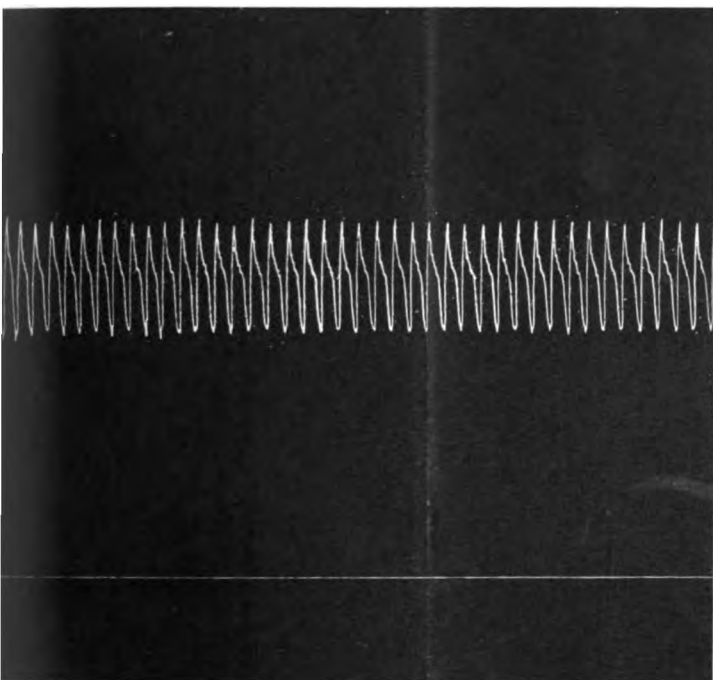
1 (*suite*). Chien pesant 21,7 kg. Chloralosé. Electrodes : patte antérieure d



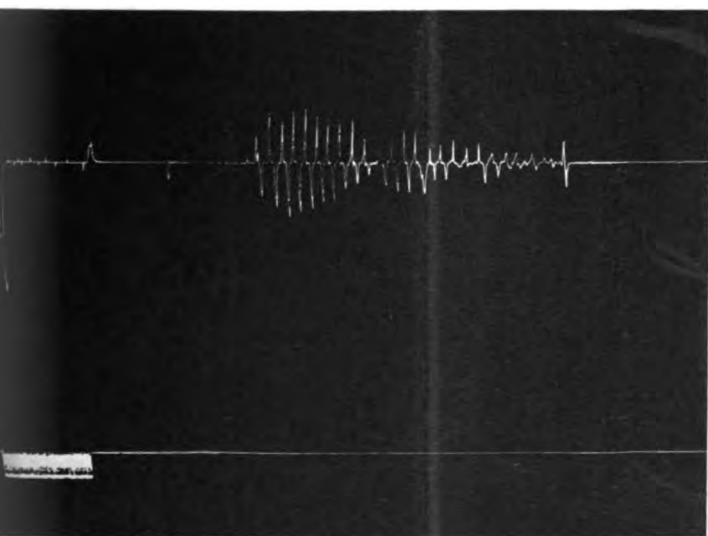
Quatrième application de la tension :
 $U = 100$ volts. $I = 0,145$ ampère. $T = 35$ secondes.
 $R_{add} = 0$ ohm.

Cinquième ap
 $U = 100$ volts. $T =$

re droite et patte postérieure gauche. Courant alternatif : fréquence 42.



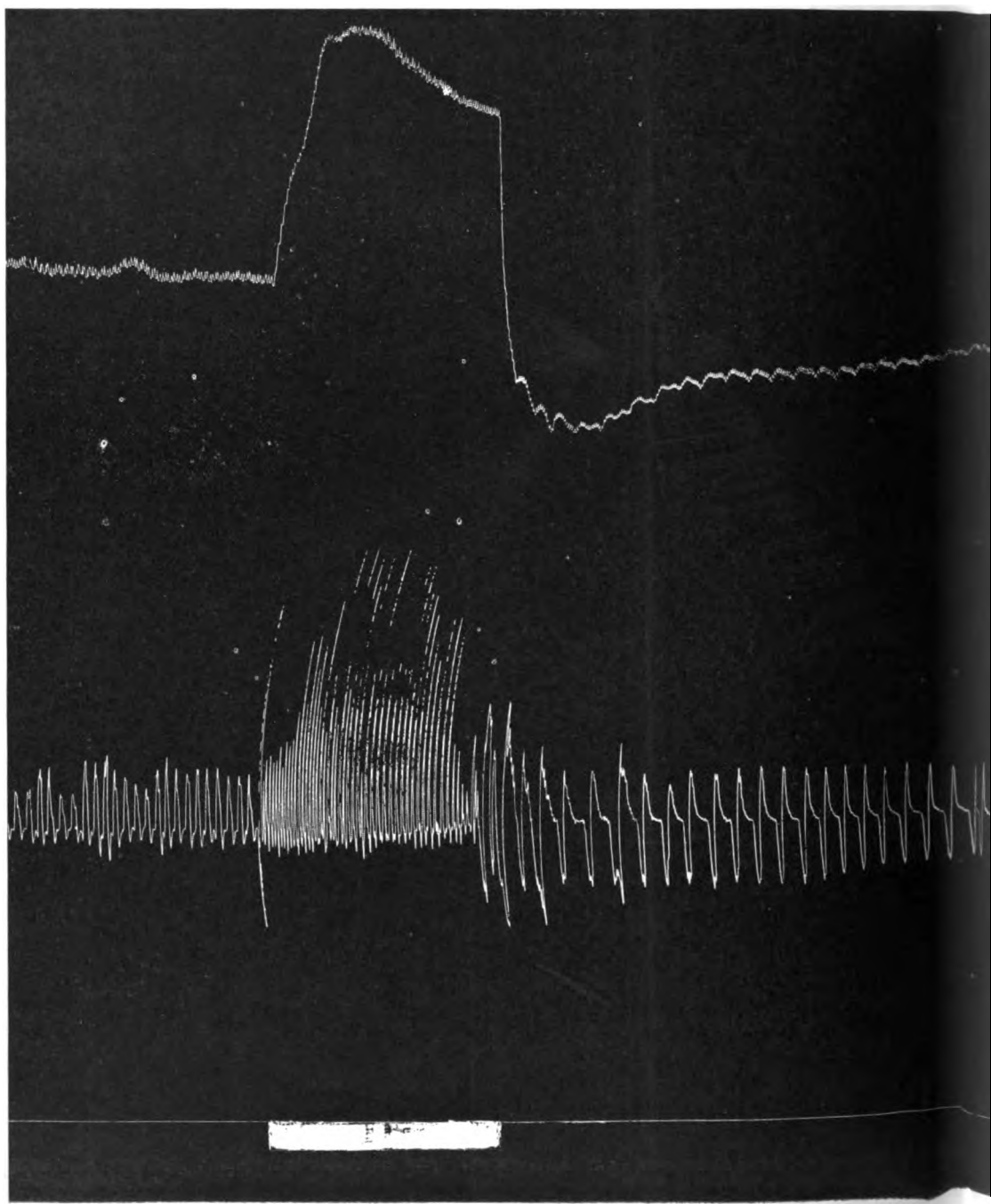
re droite et patte postérieure gauche. Courant alternatif : fréquence 42.



Application de la tension :

10 secondes. $R_{add} = 0$ ohm.

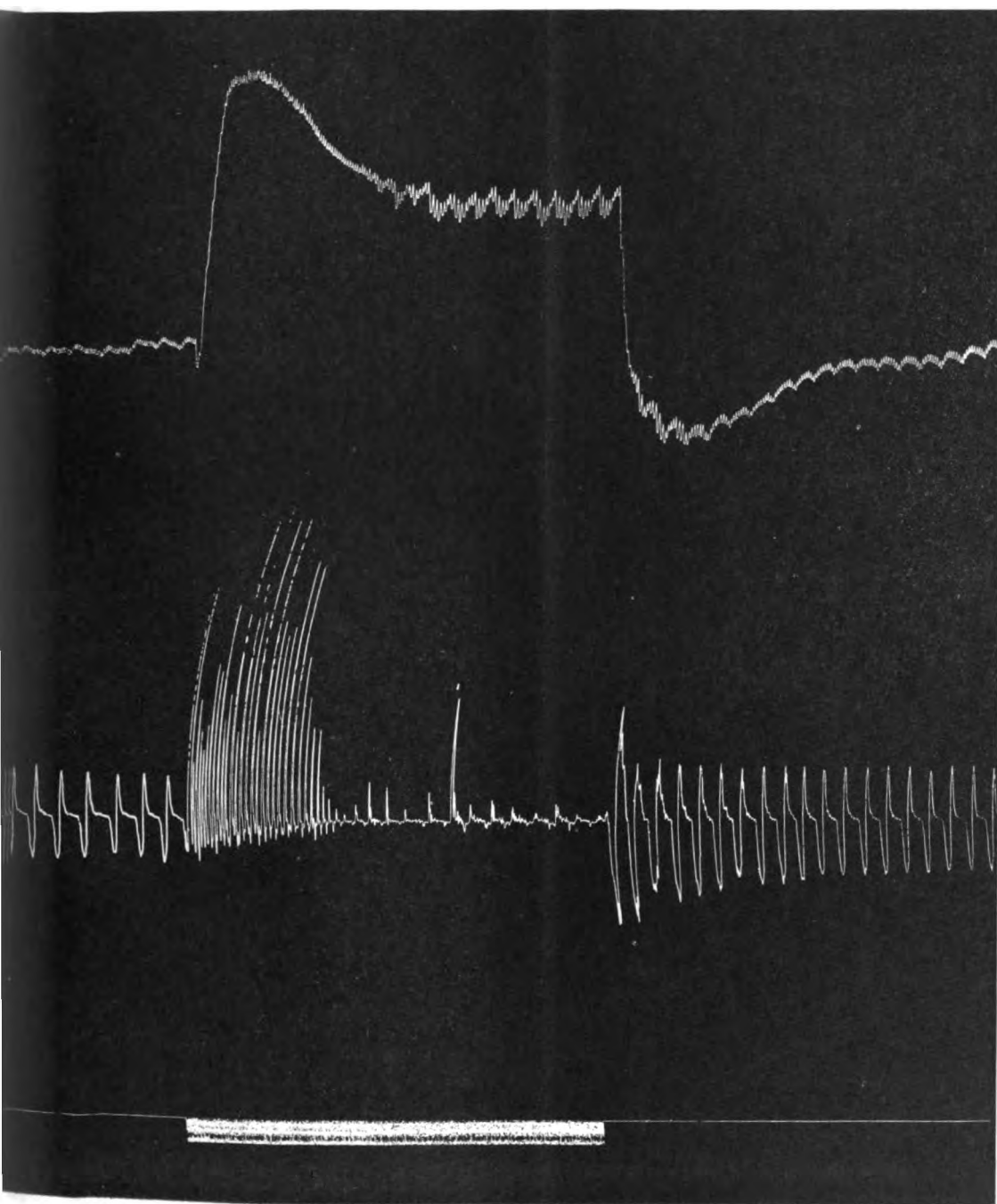
2. Chien pesant 13 kg. Chloralosé. Électrodes : pattes antérieures.



Première application de la tension :

$U = 58$ volts $I = 0,035$ ampère. $T = 32$ secondes. $R_{add} = 0$ ohm.

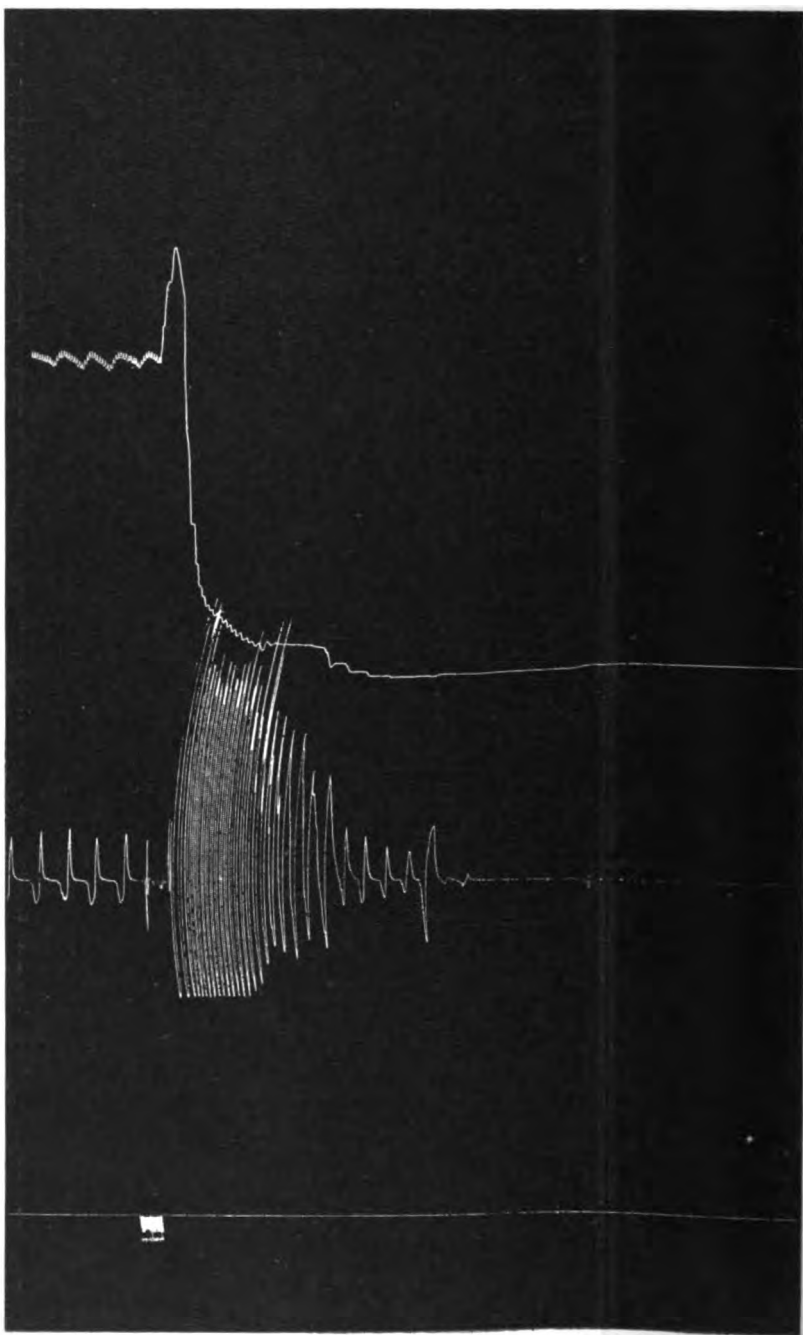
ure et postérieure droites. Courant alternatif : fréquence 42.



Deuxième application de la tension :

$U = 58$ volts, $I = 0,038$ ampère. $T = 60$ secondes. $R_{add} = 0$ ohm.

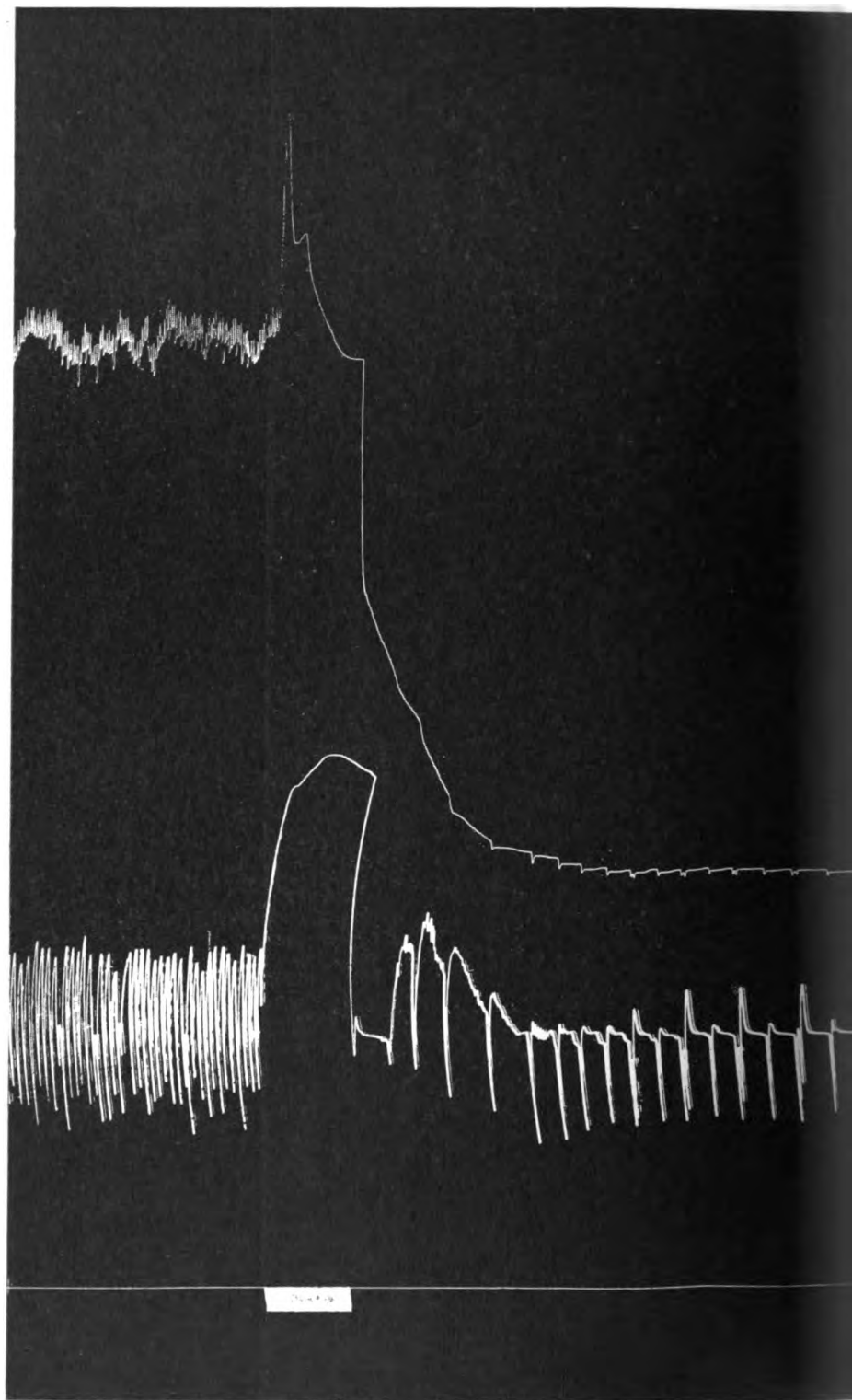
2 (suite). Chien pesant 13 kg. Chloralosé.
Electrodes : pattes antérieure et postérieure droites.
Courant alternatif : fréquence 42.



Troisième application de la tension :

$U = 103$ volts. $I = 0,068$ ampère.
 $T = 3$ secondes. $R_{add} = 0$ ohm.

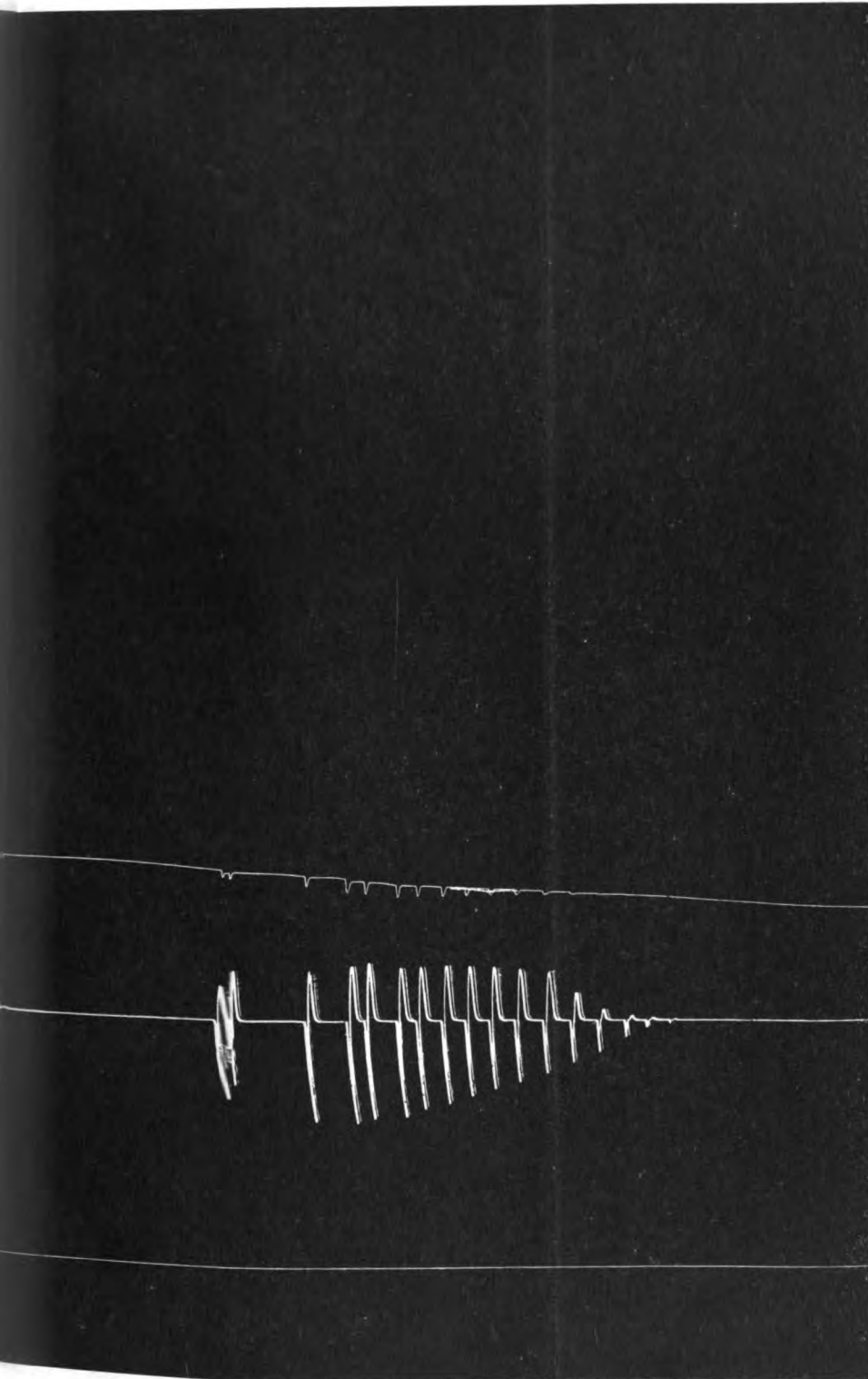
4. Chien pesant 23 kg. Chloralosé. Électrodes : pattes antérieures.



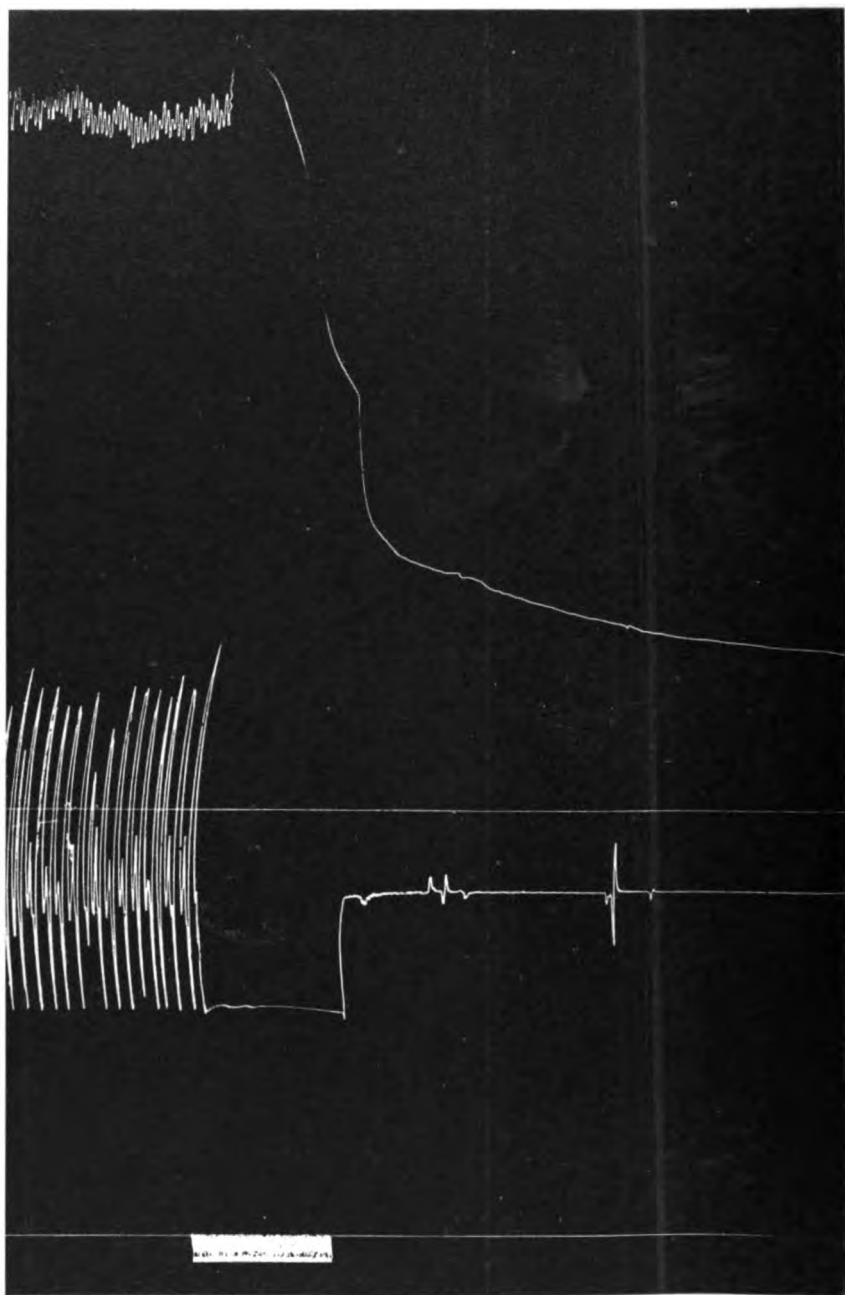
Application de la tension :

$U = 380$ volts. $I = 0,600$ ampère. $T = 10$ secondes. $R_{add} = 0$ ohm.

neure et postérieure droites. Courant alternatif : fréquence 40.



5. Chien pesant 14 kg. Chloralosé. Électrodes : pattes antérieure et postérieure droites.
Courant alternatif : fréquence 4'.

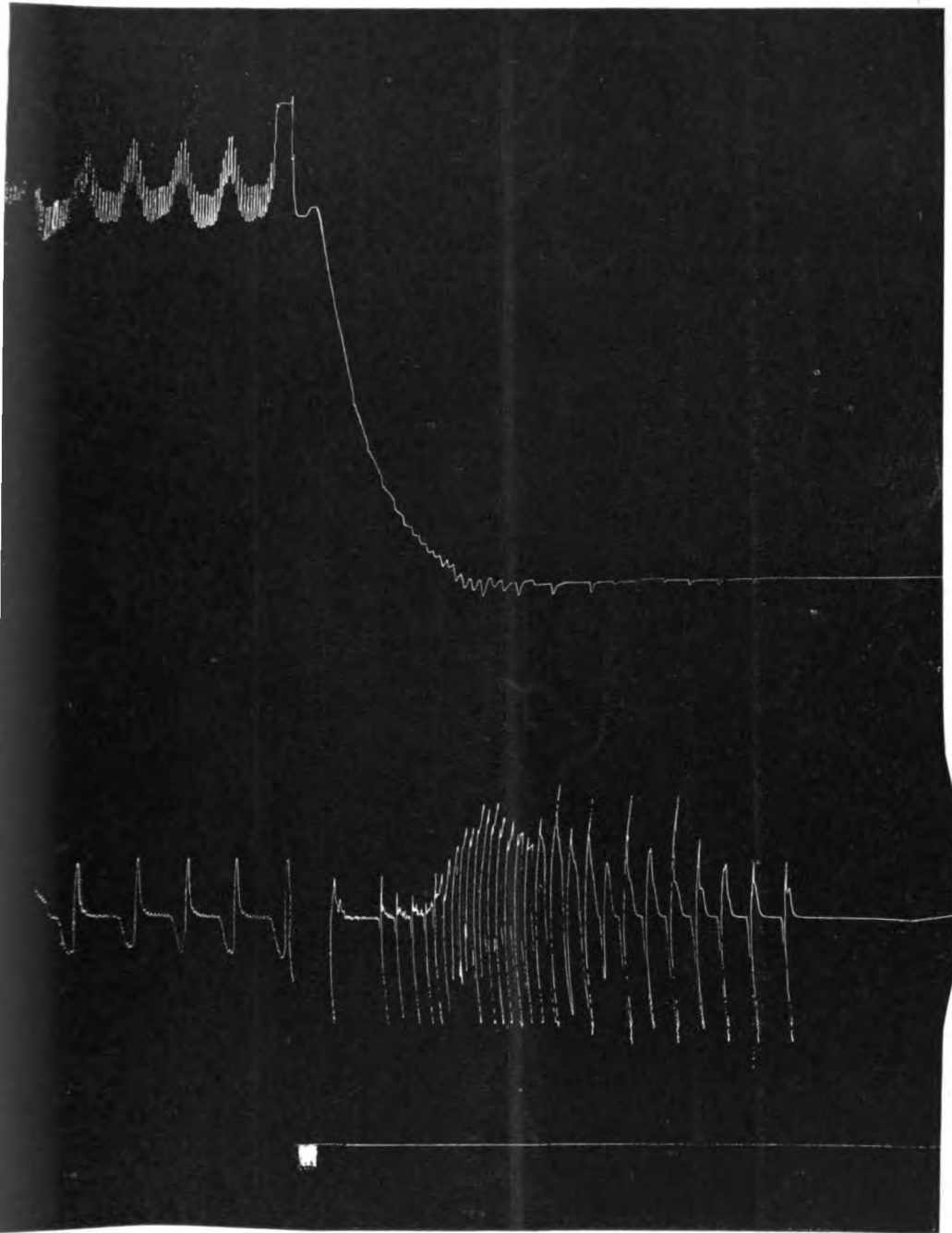


Application de la tension :

$U = 1140$ à 1080 volts. $I = 1,5$ à 2 ampères. $T = 18$ secondes.

$R_{add} = 0$ ohm.

6. Chien pesant 30 kg. Chloralosé. Électrodes : pattes antérieure et postérieure droites.
Courant alternatif : fréquence 42.

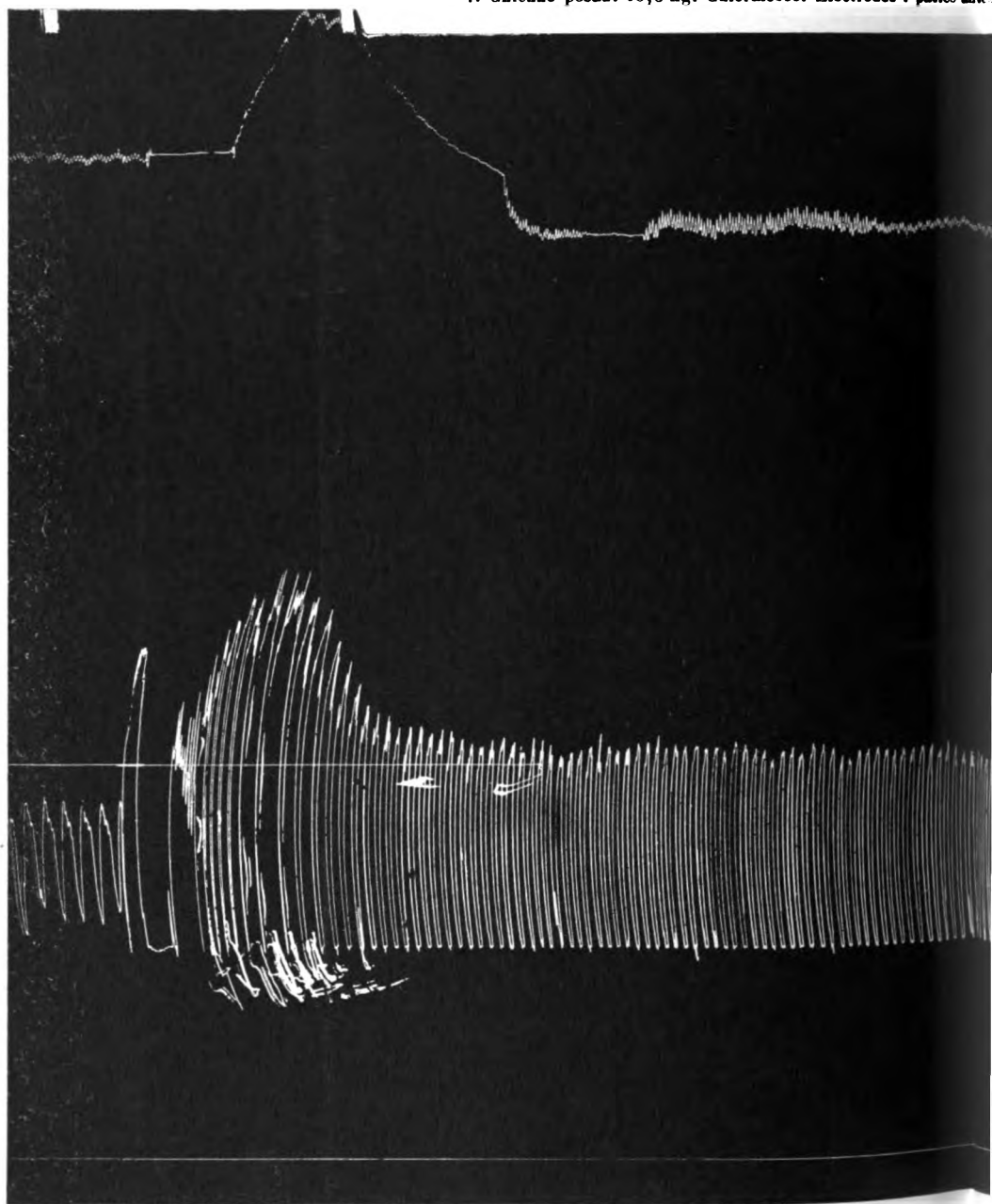


. Application de la tension :

$V = 0.50$ à 1.30 volts. $I = 4.6$ ampères. $T = 3$ secondes.

$R_{add} = 0$ ohm.

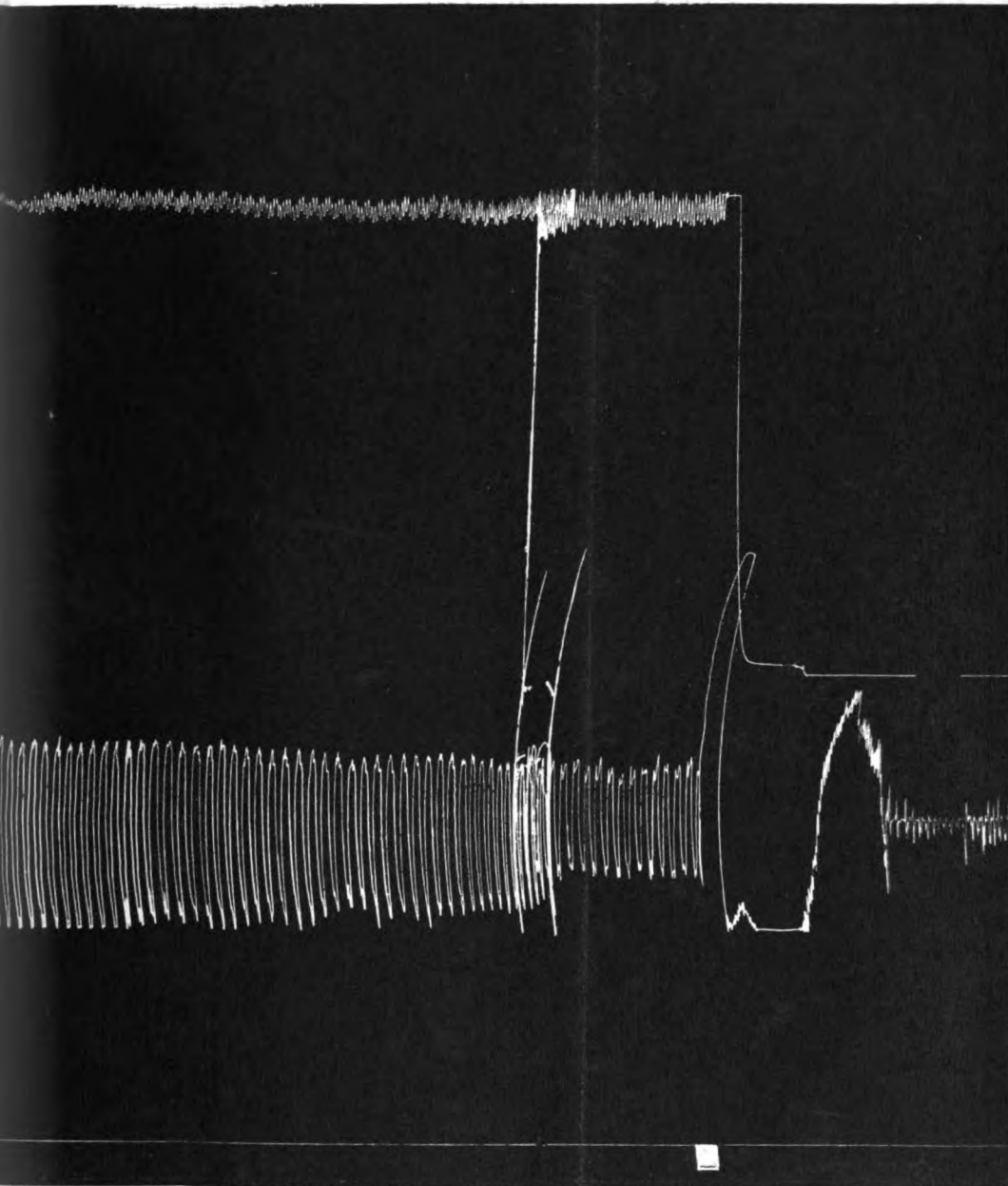
7. Chienne pesant 10,8 kg. Chloralosée. Electrodes : pattes ant-



Première application
de la tension :

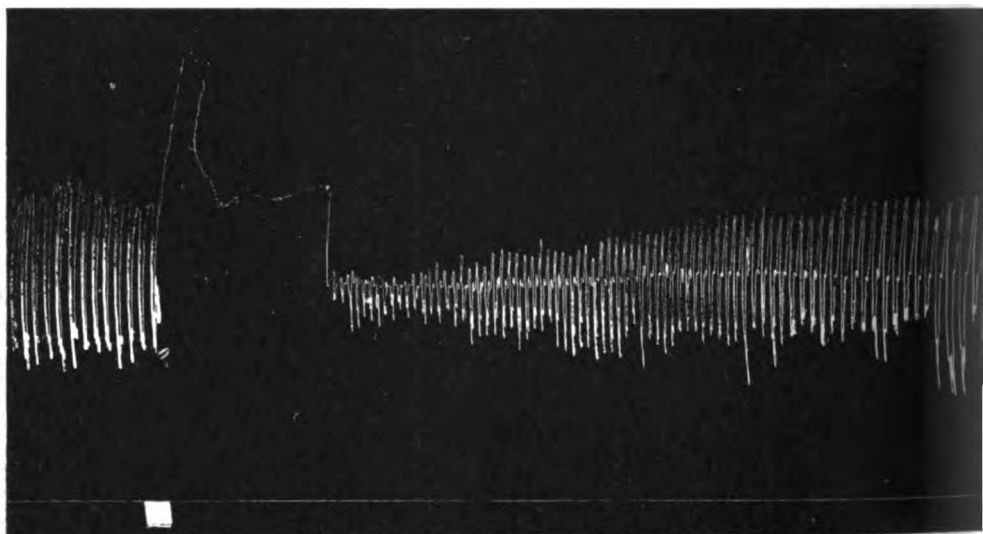
$U = 4000 \text{ à } 3800 \text{ volts.}$ I non mesuré.
 $T = 0,2 \text{ seconde.}$ $R_{add} = 0 \text{ ohm.}$

Antérieure et postérieure gauches. Courant alternatif : fréquence 42.



Deuxième application
de la tension :
Pas d'inscription.
Mêmes conditions
que précédemment.

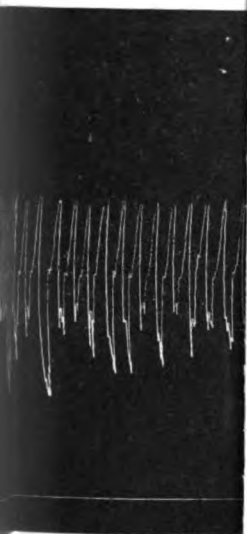
Troisième application
de la tension :
 $U = 4600$ à 2700 volts.
 $I = 7$ amp. $T = 3$ sec.
 $R_{add} = 0$ ohm.



Quatrième application de la tension :
Mêmes conditions que précédemment.

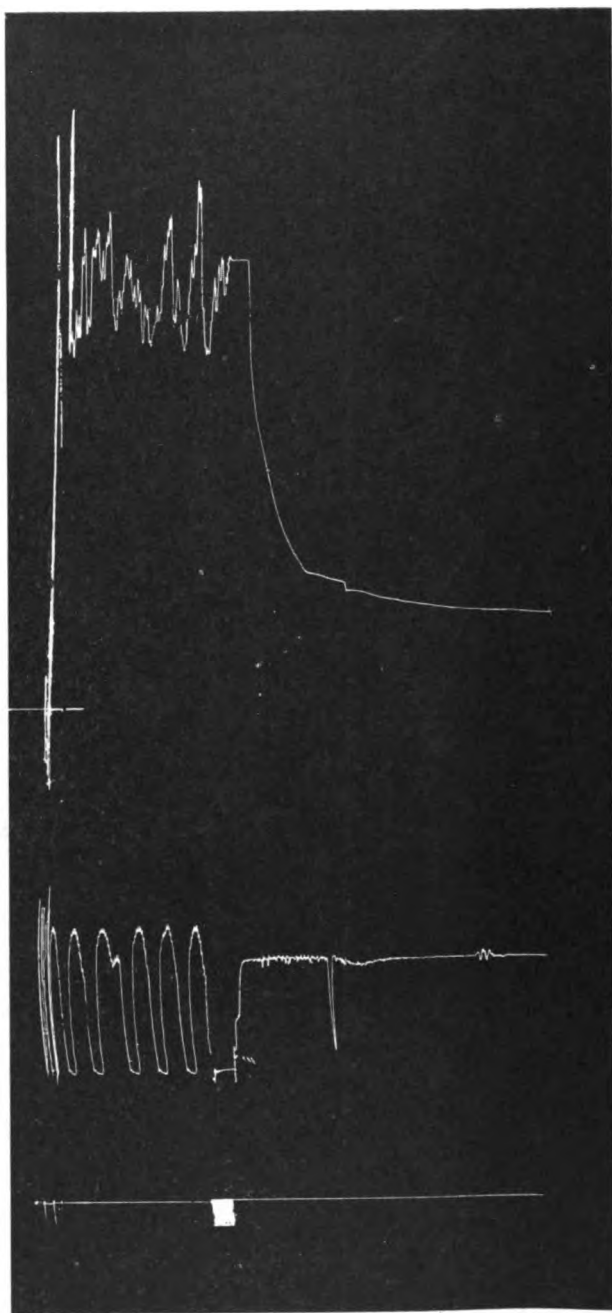
L'électrode de la patte postérieure gauche est placée à la patte

7. (*suite*). Chienne pesa



postérieure droite.

8. Chien pesant 23 kg. Chloralosé.
Électrodes : pattes antérieure et postérieure droites.
Courant alternatif : fréquence 42.



Application de la tension :

$U = 4500$ à 2900 volts. $I = 8$ ampères.
 $T = 3$ secondes. $R_{add} = 0$ ohm.



Première application d

$U' = 4500$ volts. $I =$
 $T = 0,01$ seconde. R_{ad}

9. Chienne pes



la tension :
Première = 5300 ohms.
" = 0,01 ampère.
" = 99 000 ohms.

9 (*suite*). Chienne pesant 11 kg. Chloralosee. Electrode
Courant alternatif. (fr.)



Troisième application de la tension
Mêmes conditions que précédemment
(Caillot dans la canule pour la prise de la pression)

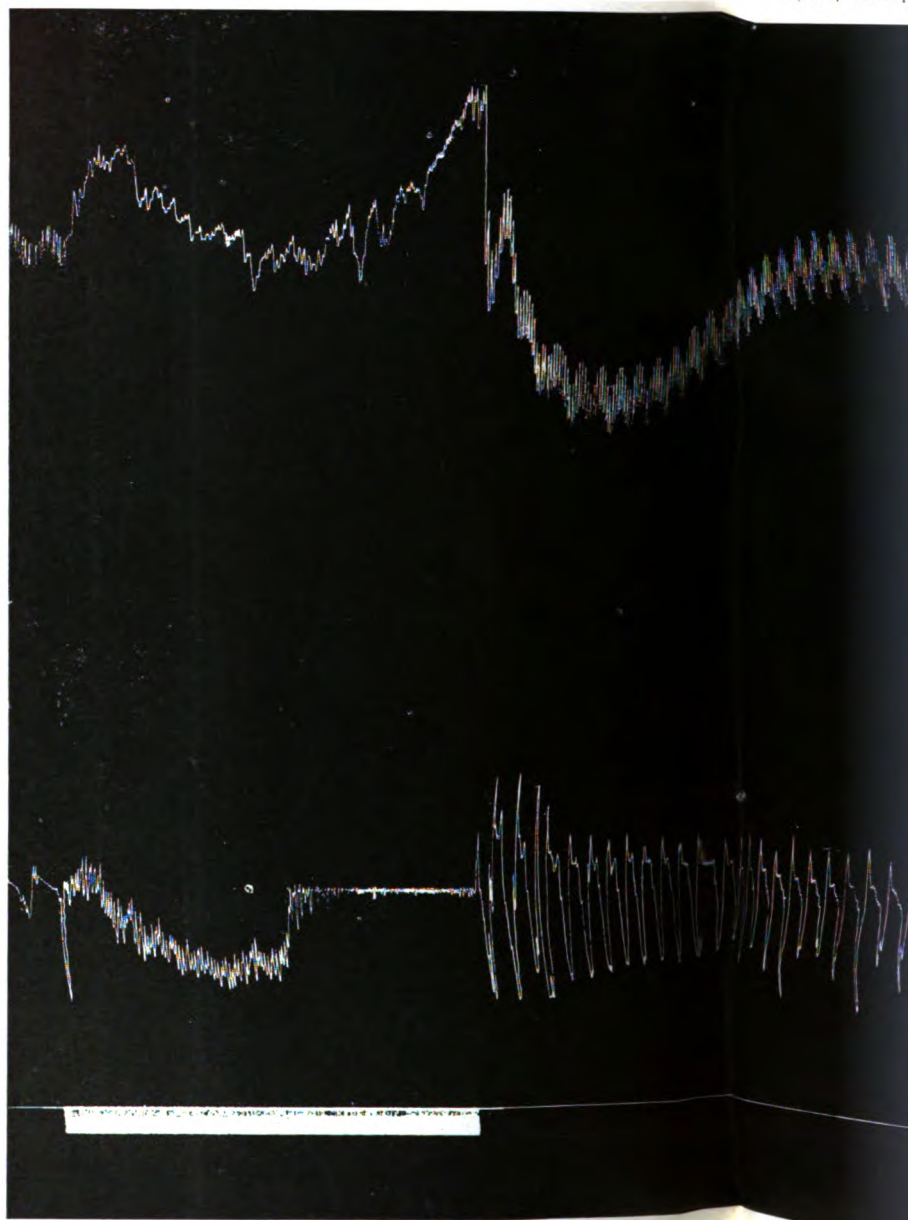
1er Août-Septembre-Octobre 1911.

Pl. IV.

Electrodes : pattes antérieure et postérieure gauches.
f : fréquence 24.



sanguine.)

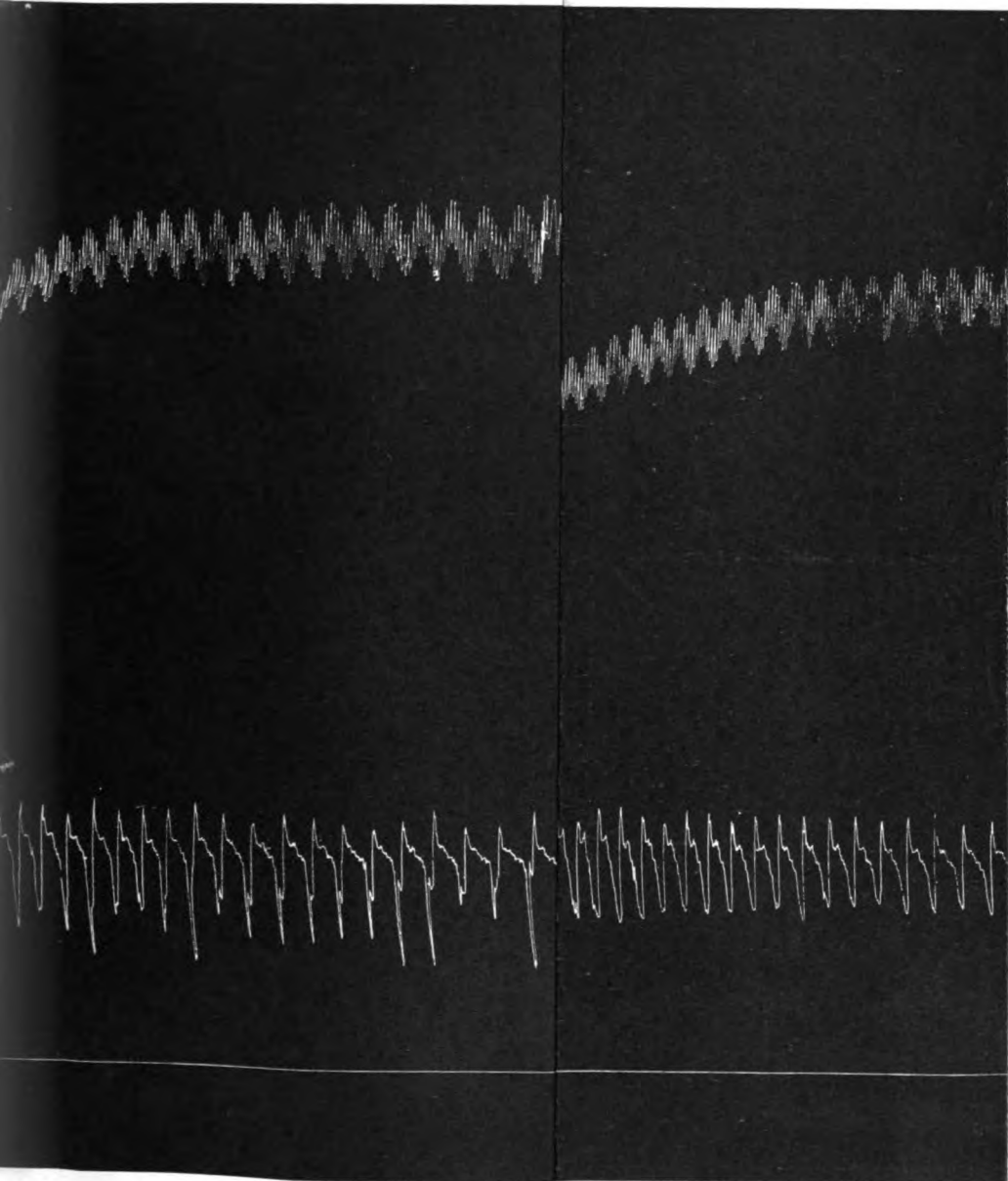


Quatrième application de la tension
(Electrodes : patte antérieure gauche et patte postérieure droite) :
Mêmes conditions que précédemment, sauf $T = 53$ secondes.

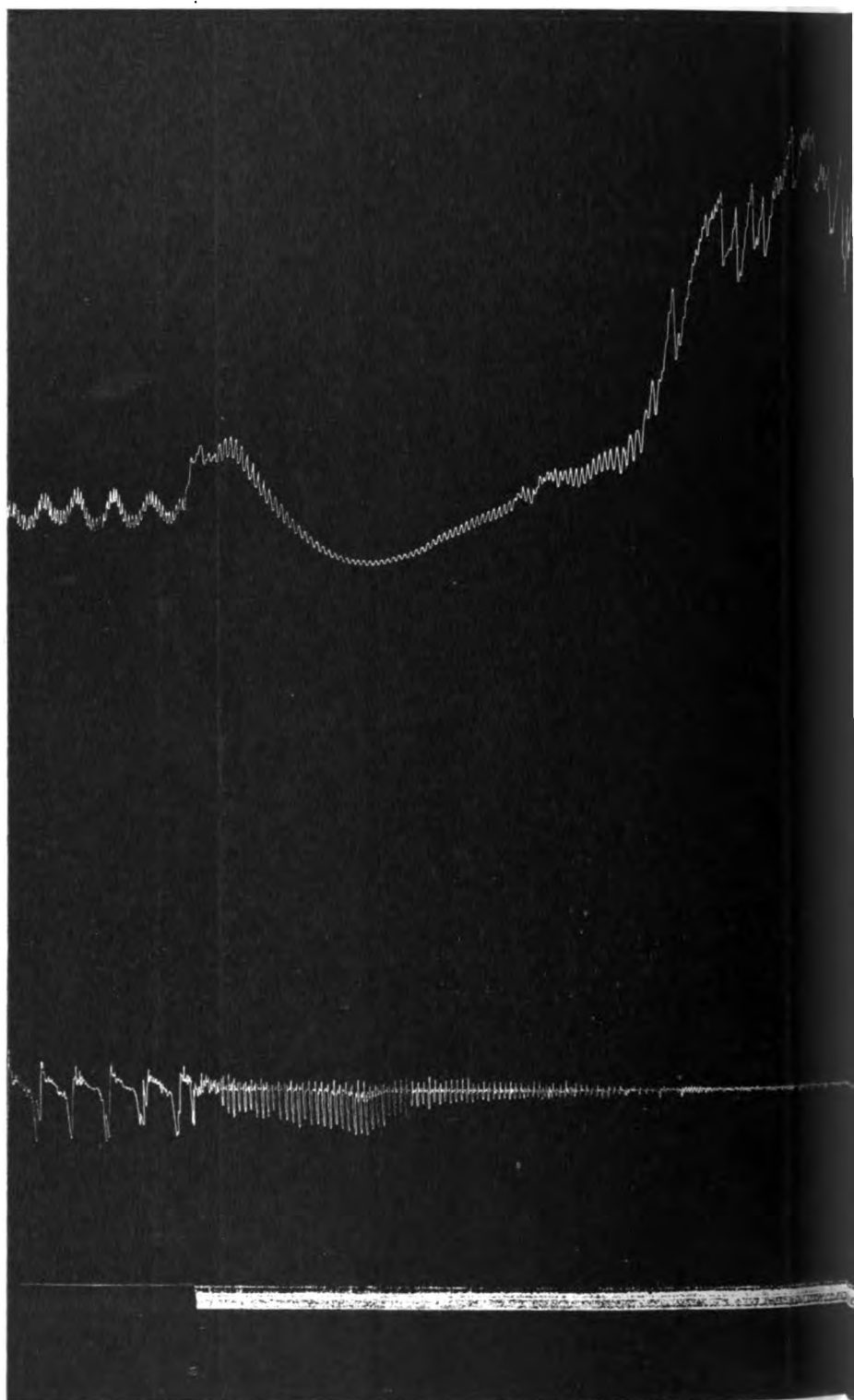
octobre 1911.

Pl. XI.

9 (*suite*). Chienne pesant 11 kg. Chloralose. Électrode

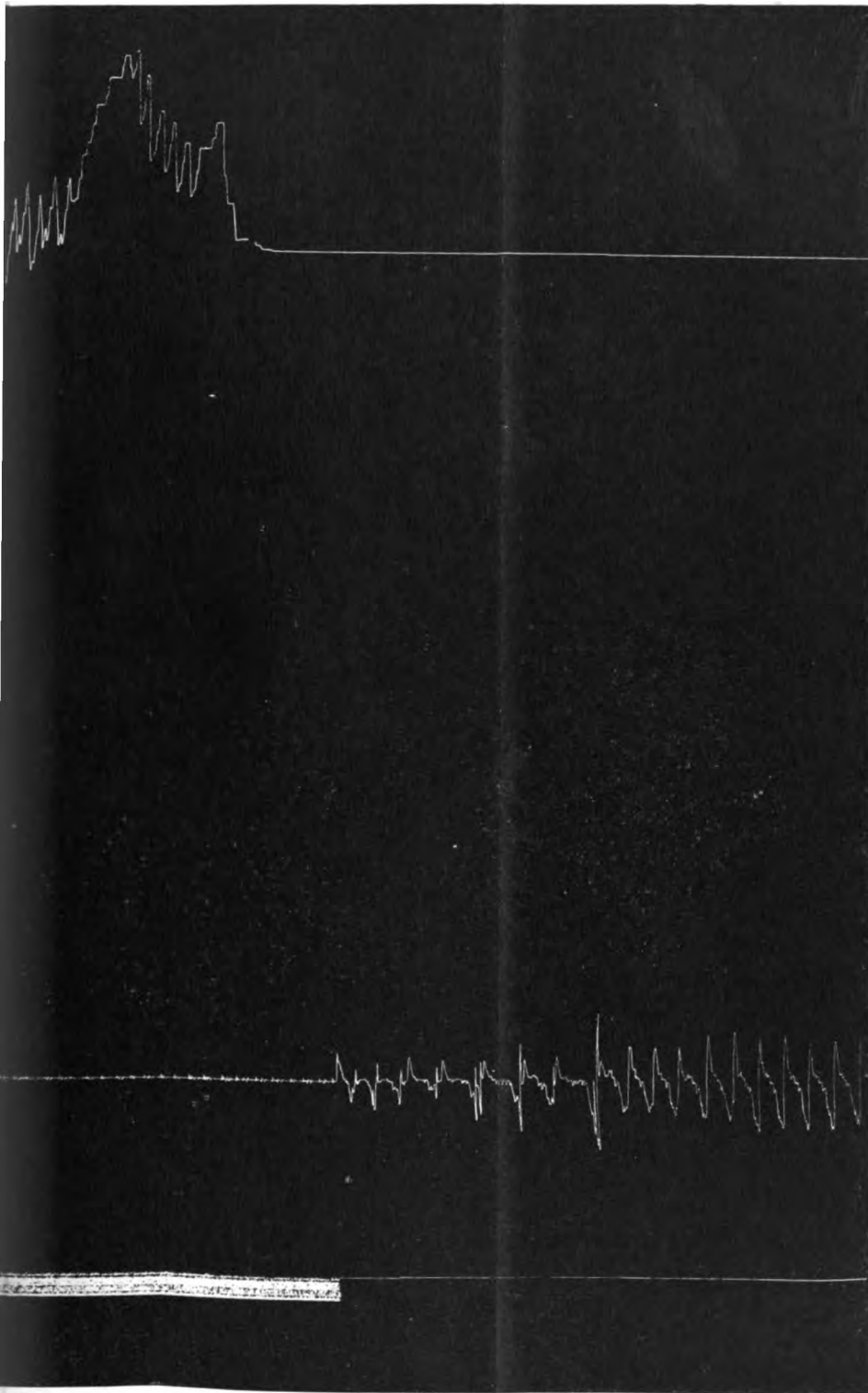


9 (*suite*). Chienne pesant 11 kg. Chloralosée. Electrodes : patte antérieure.



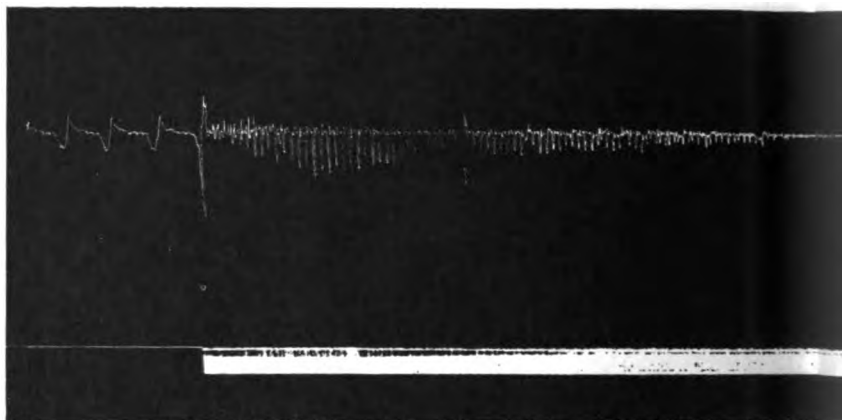
Sixième application de la tension :
Mêmes conditions que précédemment, sauf $T = 2$ minute.

re gauche et patte postérieure droite. Courant alternatif : fréquence 4°.



30 secondes.

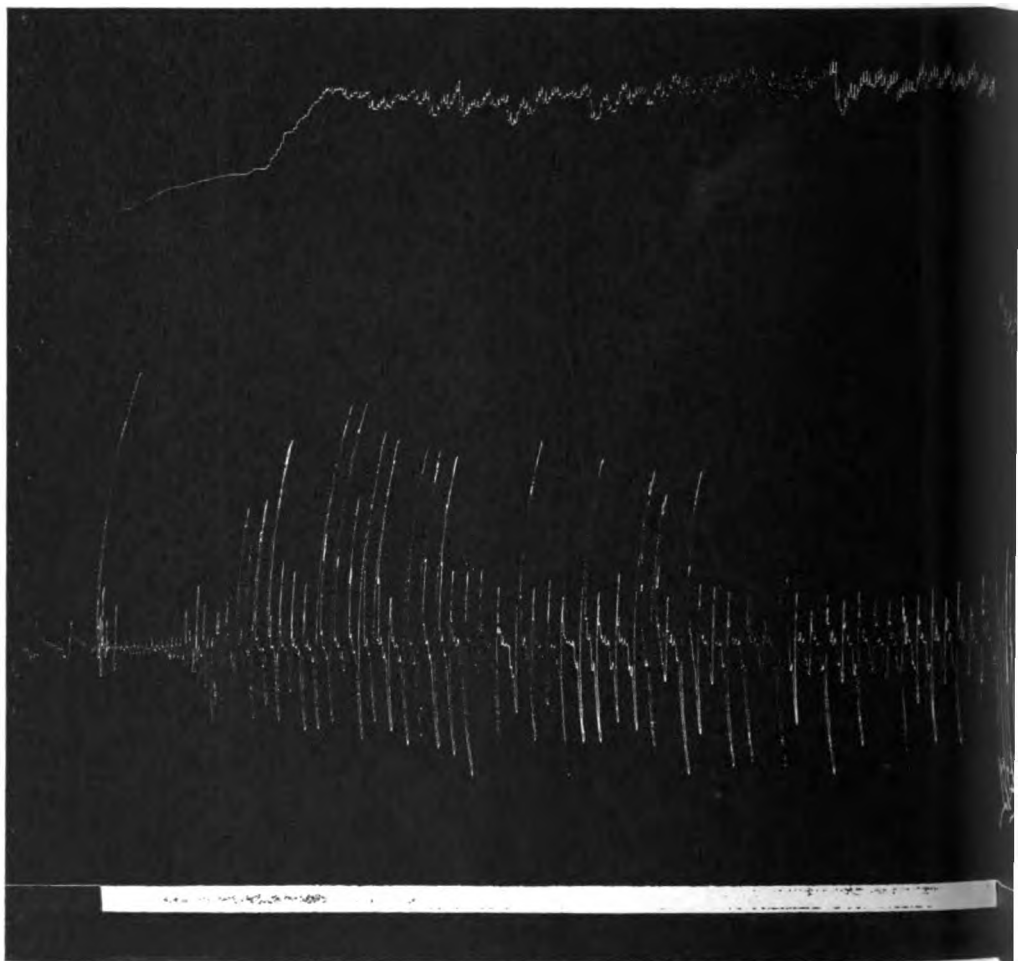
9 (suite). Chienne pesant 11 kg. Chloralosée. Electrodes : patte antérieure



Septième application de la tension

Mêmes conditions que précédemment. (Pas d'insensibilisation)

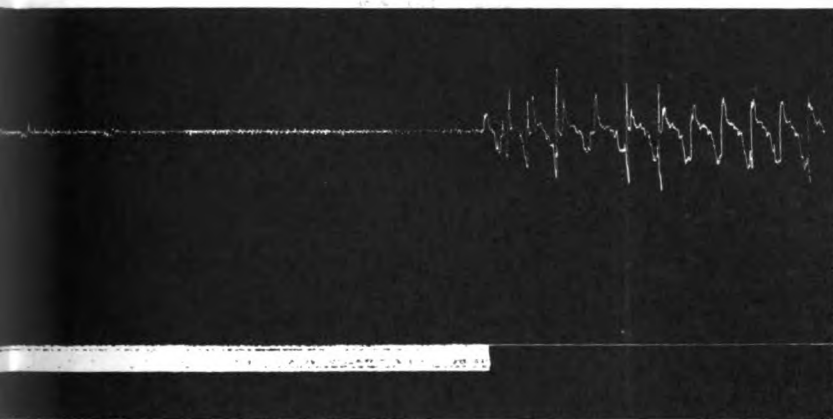
10. Chien pesant 13 kg. Chloralosé. Electrodes : pattes antérieures



Première application de la tension

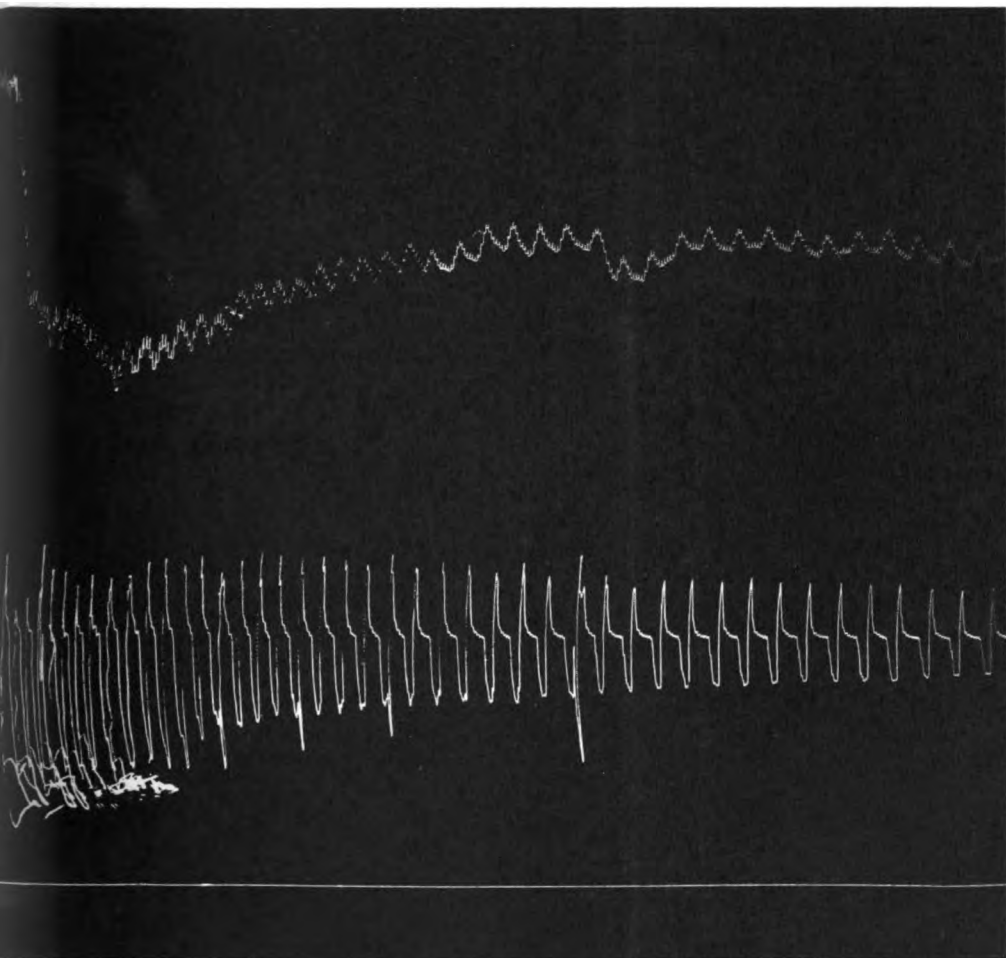
$U_{\text{eff}} = 4500$ volts. $I = 0,0425$ ampère. $T = 120$ secondes. $R_{\text{add}} = 99000$ ohms.

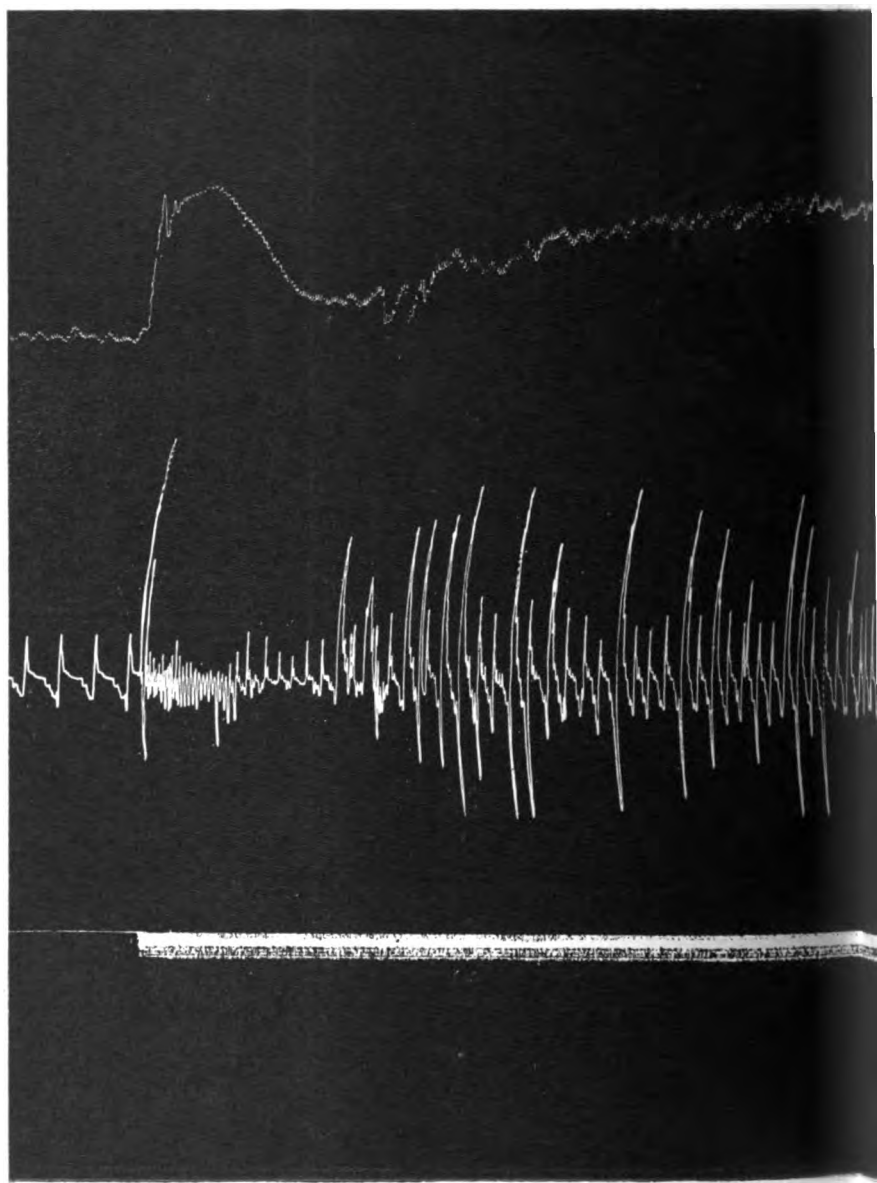
ore gauche et patte postérieure droite. Courant alternatif : fréquence 43.



pression :
description des mouvements du cœur.)

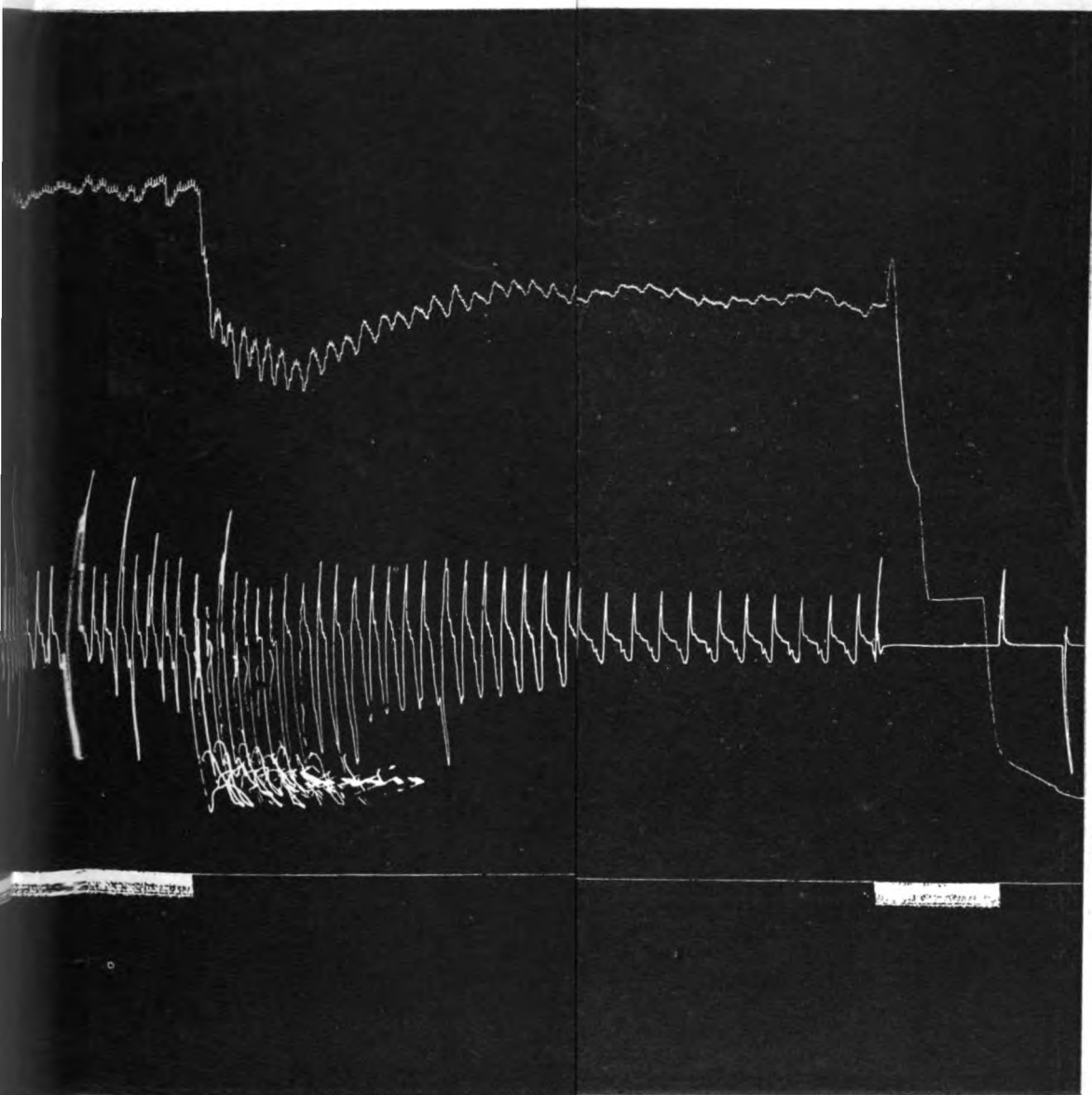
érieure et postérieure droites. Courant alternatif : fréquence 43.





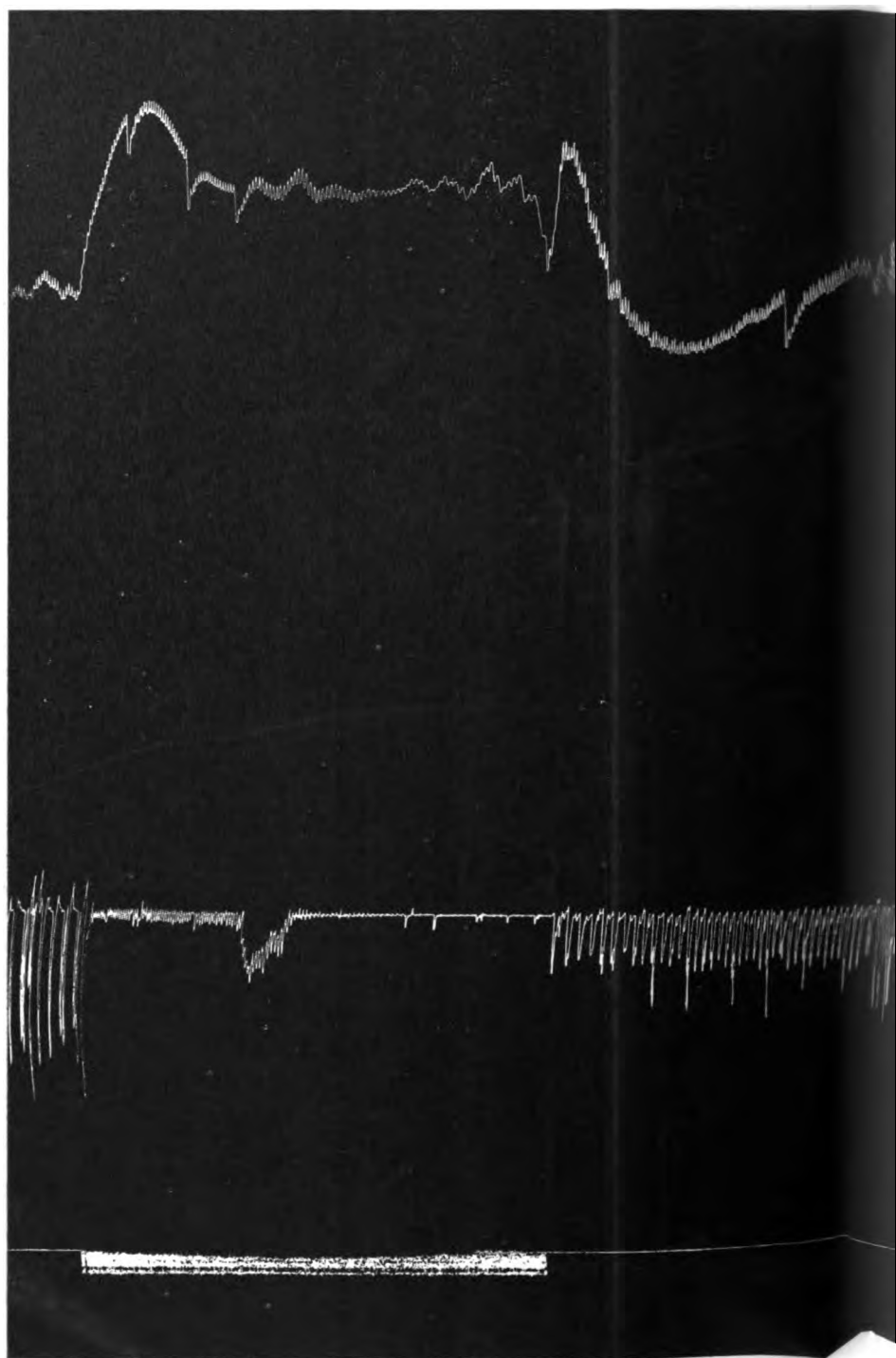
Deuxième application de la tension :
Mêmes conditions que précédemment.

10 (*suite*). Chien pesant 13 kg. Chloralosé. Électro



Troisième application de la tension :
 $U = 4500$ volts. $I = 0,089$ ampère. $T = 17$ secondes.
 $R_{add} = 49500$ ohms.

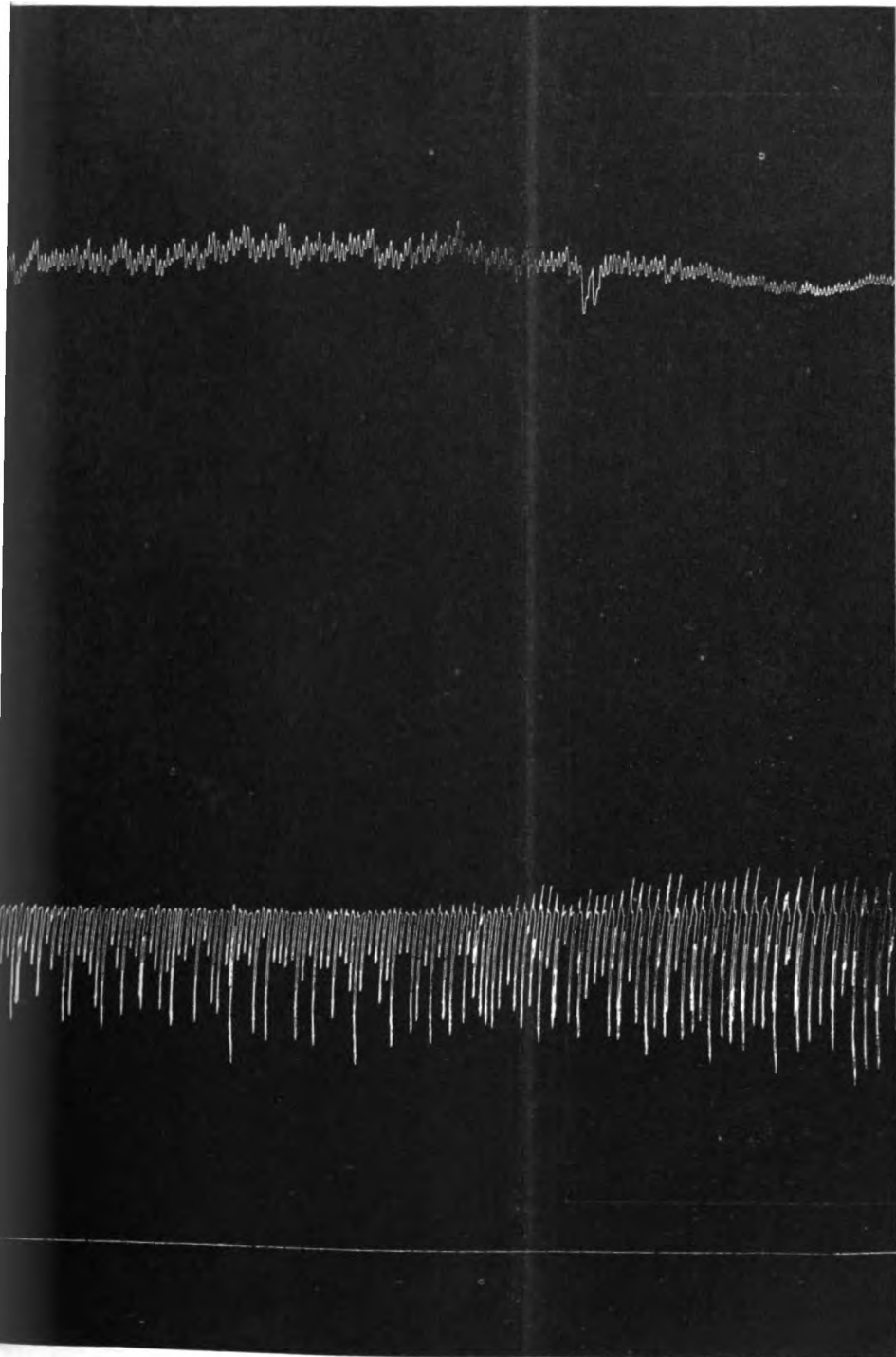
13. Chien pesant 19 kg. Chloralosé. Électrodes : pattes antérieures.



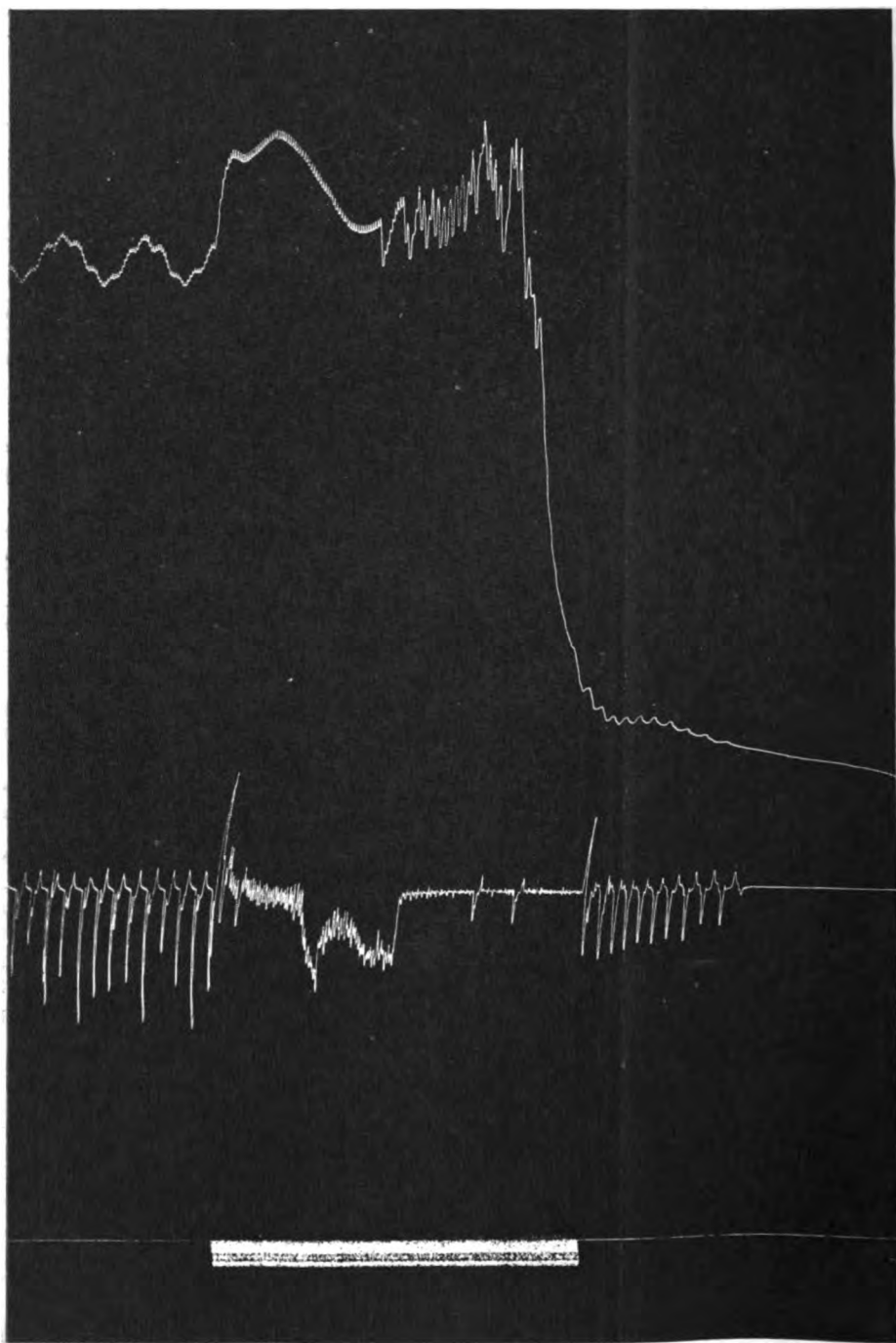
Première application de la tension :

$E = 4400$ volts. $I = 0,059$ ampère. $T = 65$ secondes.
 $R_{ad} = 74500$ ohms.

leure et postérieure droites. Courant alternatif : fréquence 42.

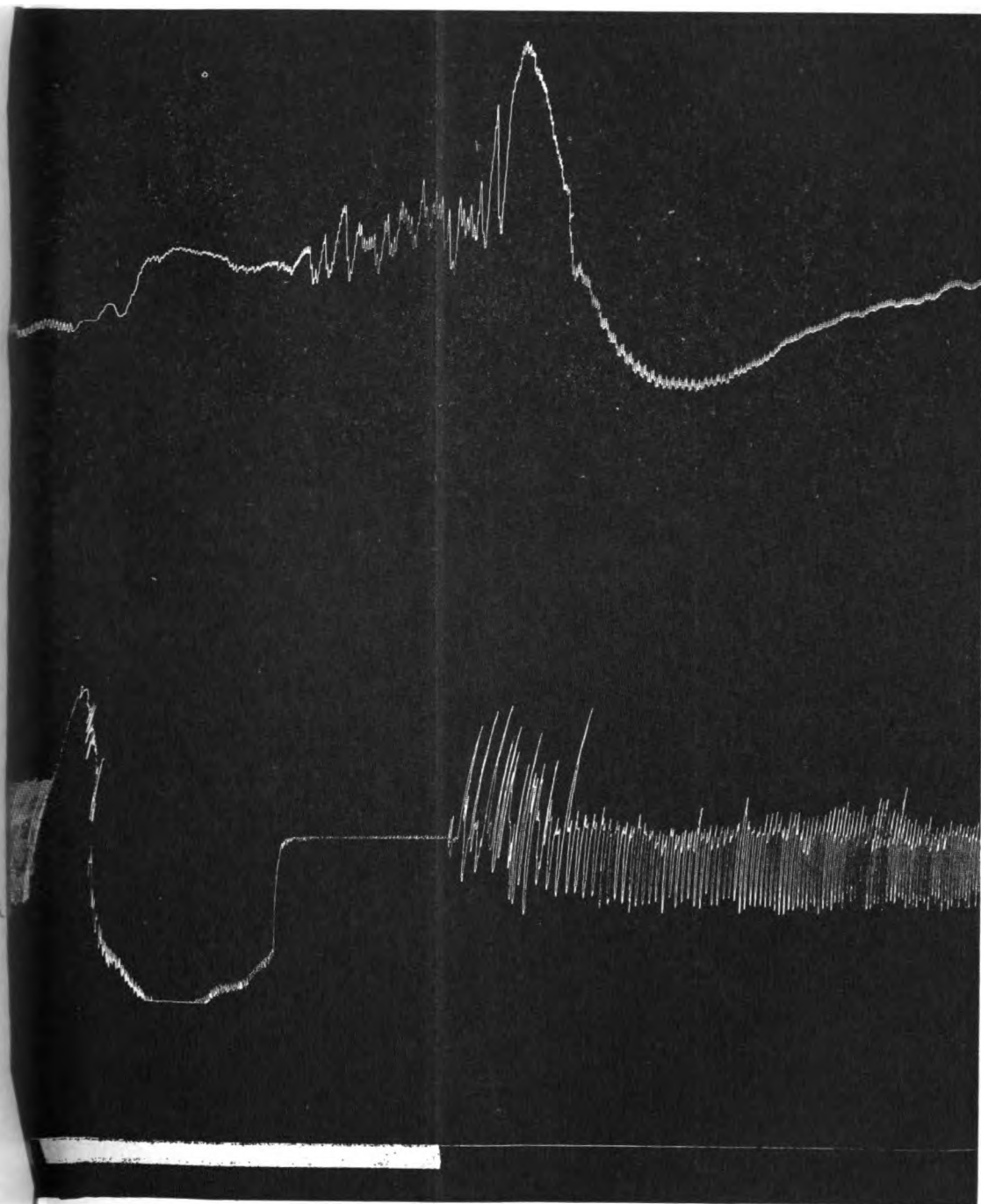


13 (*suite*). Chien pesant 19 kg. Chloralosé. Électrodes : pattes antérieure et postérieure droites.
Courant alternatif : fréquence 42.



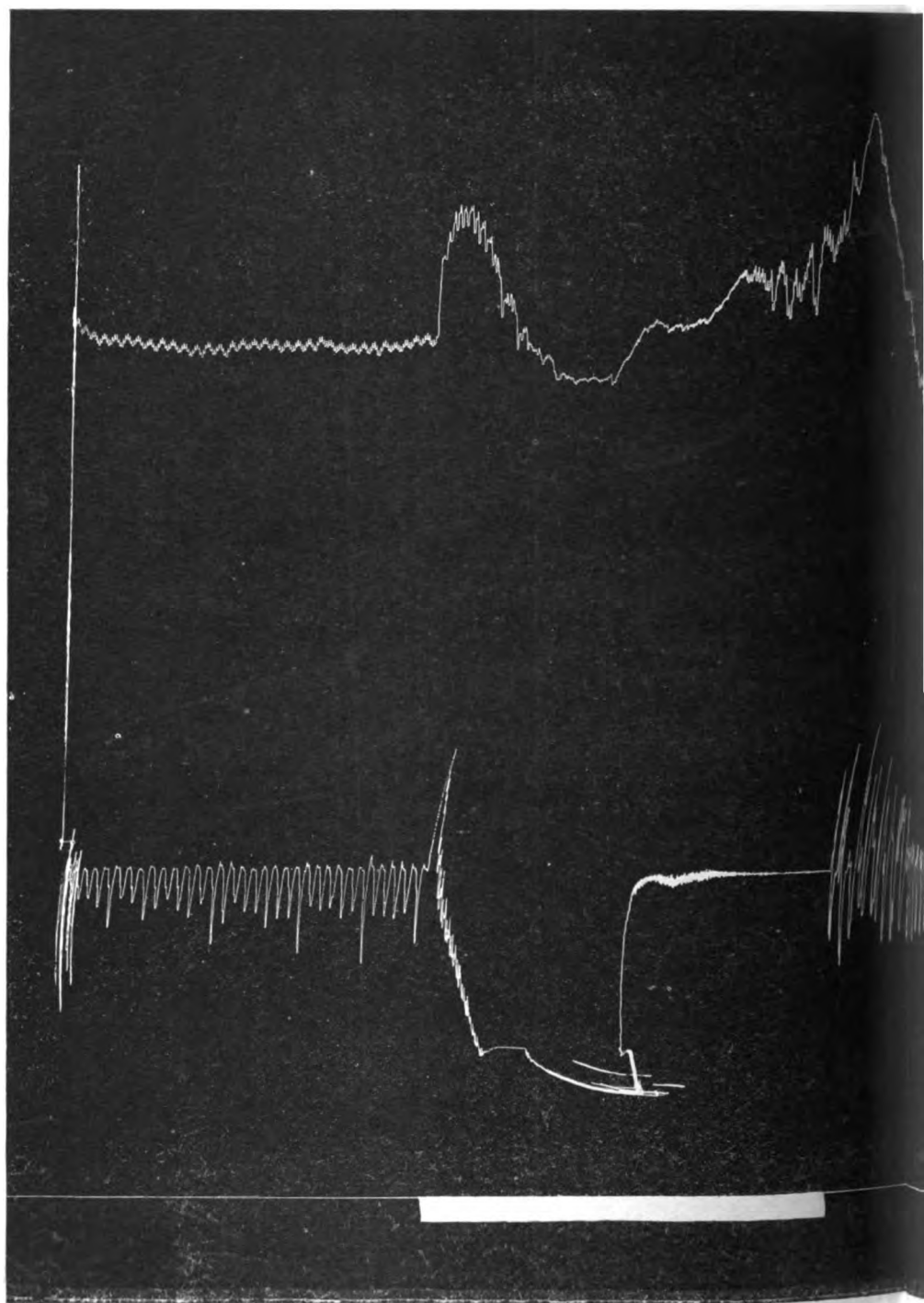
Deuxième application de la tension :
Mêmes conditions que précédemment, sauf
 $T = 40$ secondes.

15. Chien pesant 11 kg. Chloralosé. Électrodes : pattes antérieure et postérieure droites.
Courant alternatif : fréquence 42.



Première application de la tension :

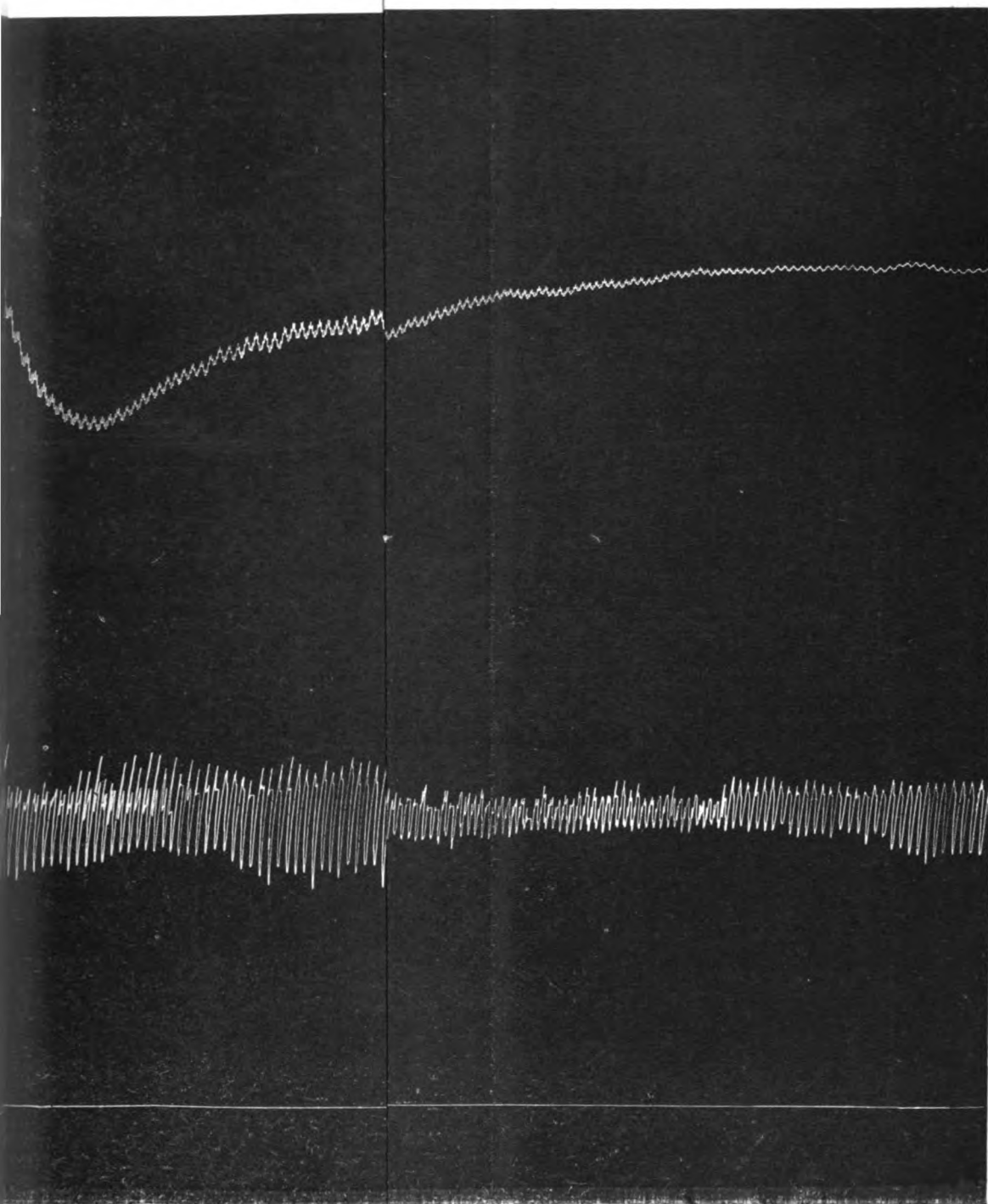
≈ 4450 volts. $I = 0,059$ ampère. $T = 60$ secondes.
 $R_{add} = 74500$ ohms.

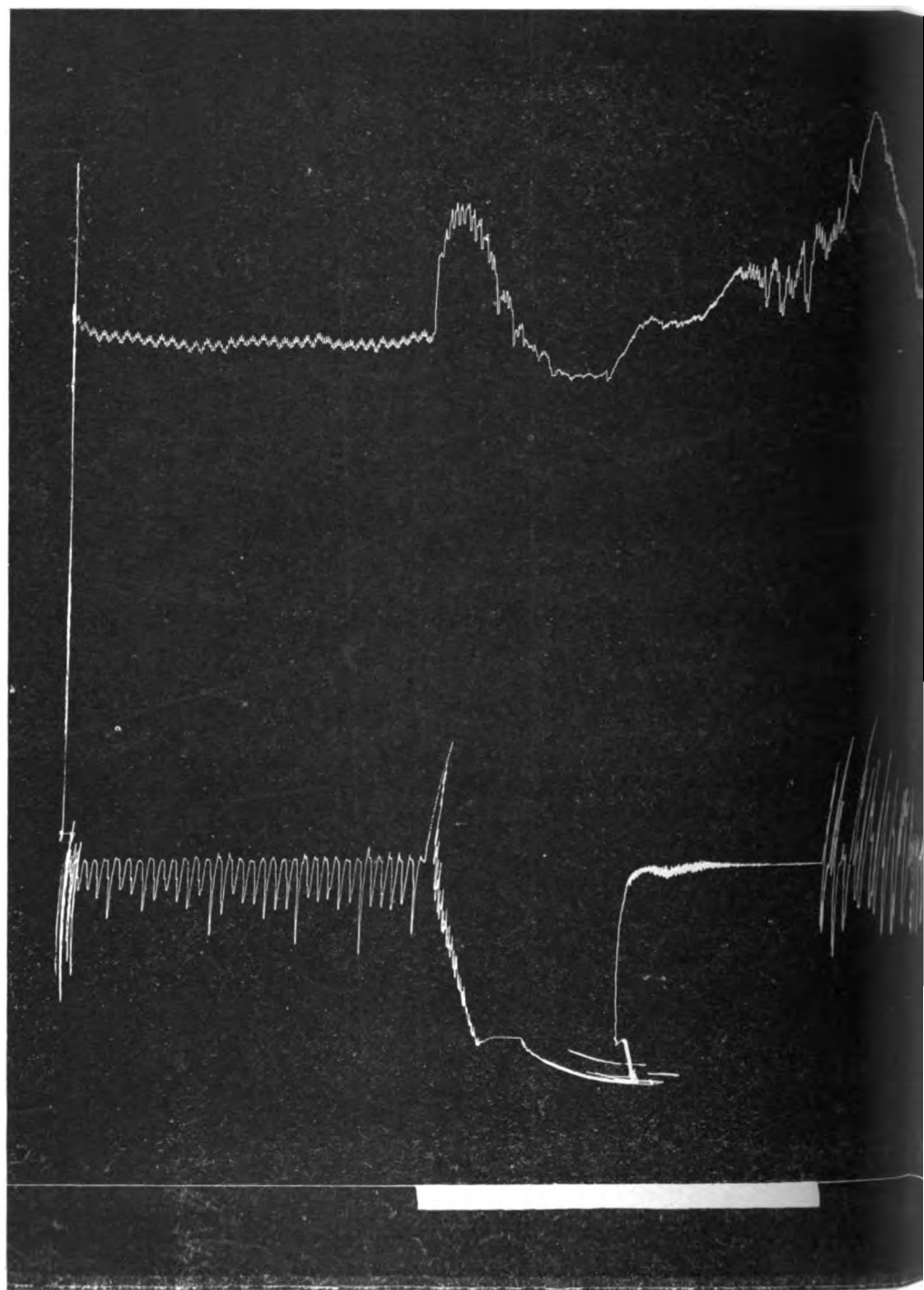


Deuxième application de la tension

$U = 4340$ volts. $I = 0,058$ ampere. $T = 60$ secondes. $R_{add} = 71500 \text{ ohms}$

15 (*suite*). Chien pesant 14

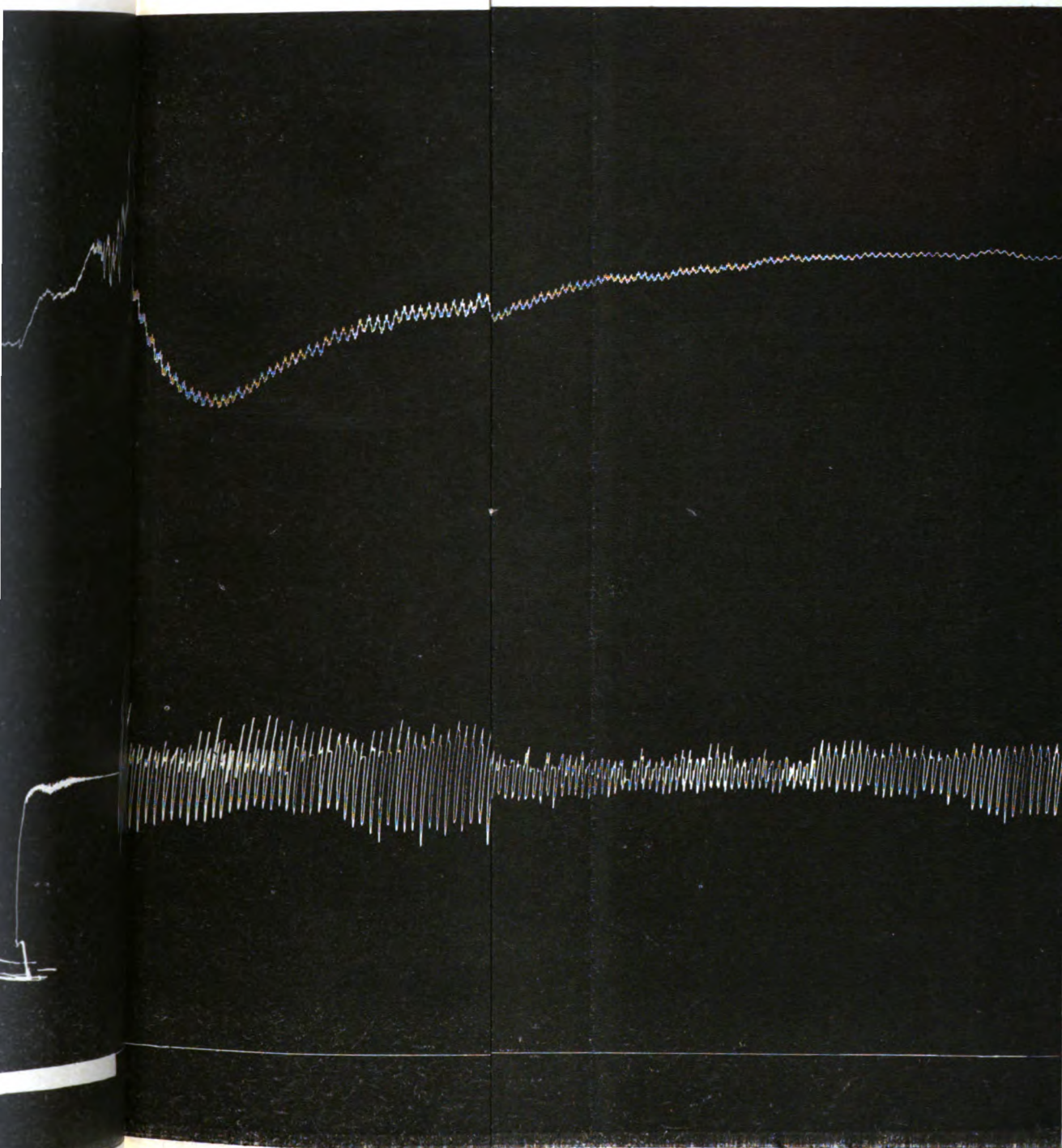




Deuxième application de la tension

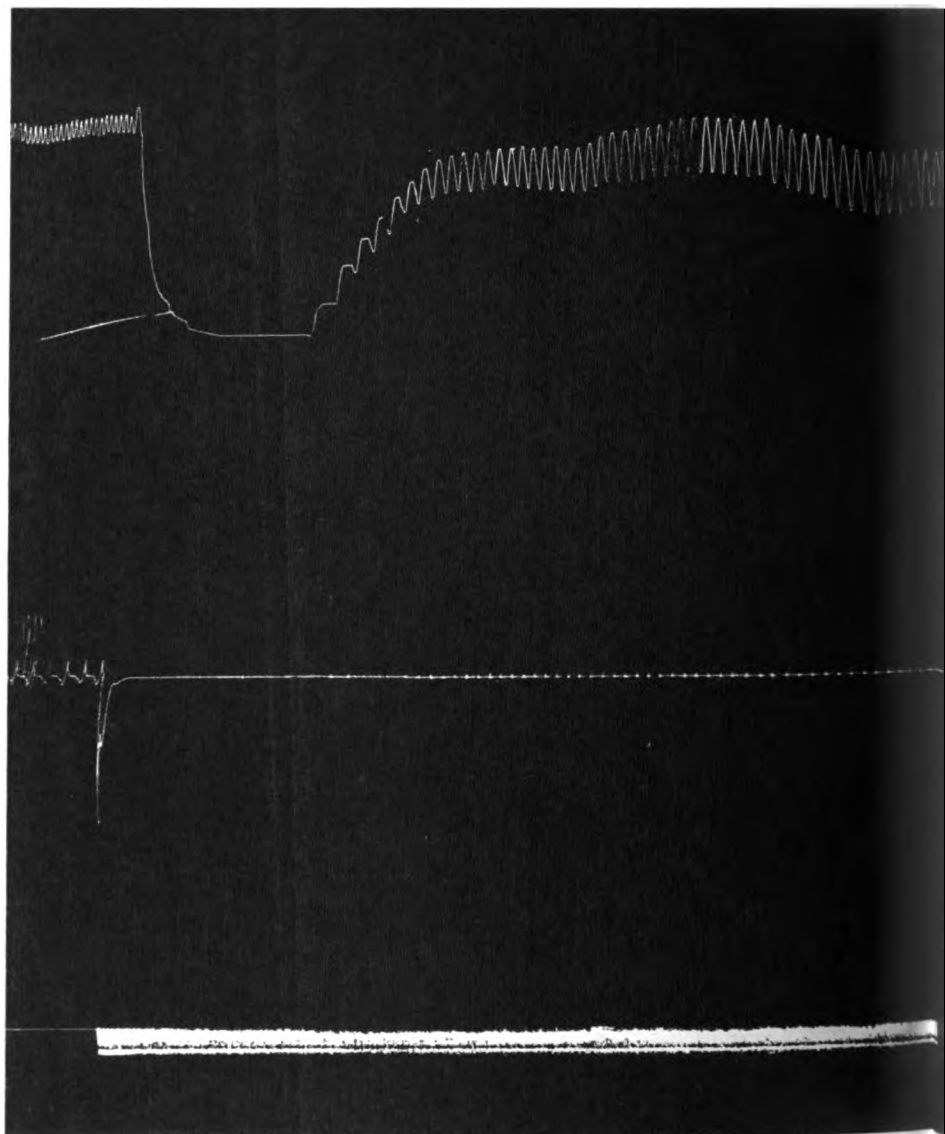
$U = 4340$ volts. $I = 0,058$ ampere. $T = 60$ secondes. $R_{\text{ad}} = 71000 \text{ ohms}$

15 (*suite*). Chien pesant 11



lication de la tension ms.
 $T = 60$ secondes

18. Chienne pesant 11,5 kg. Chloralosée. Électrodes : sur le som

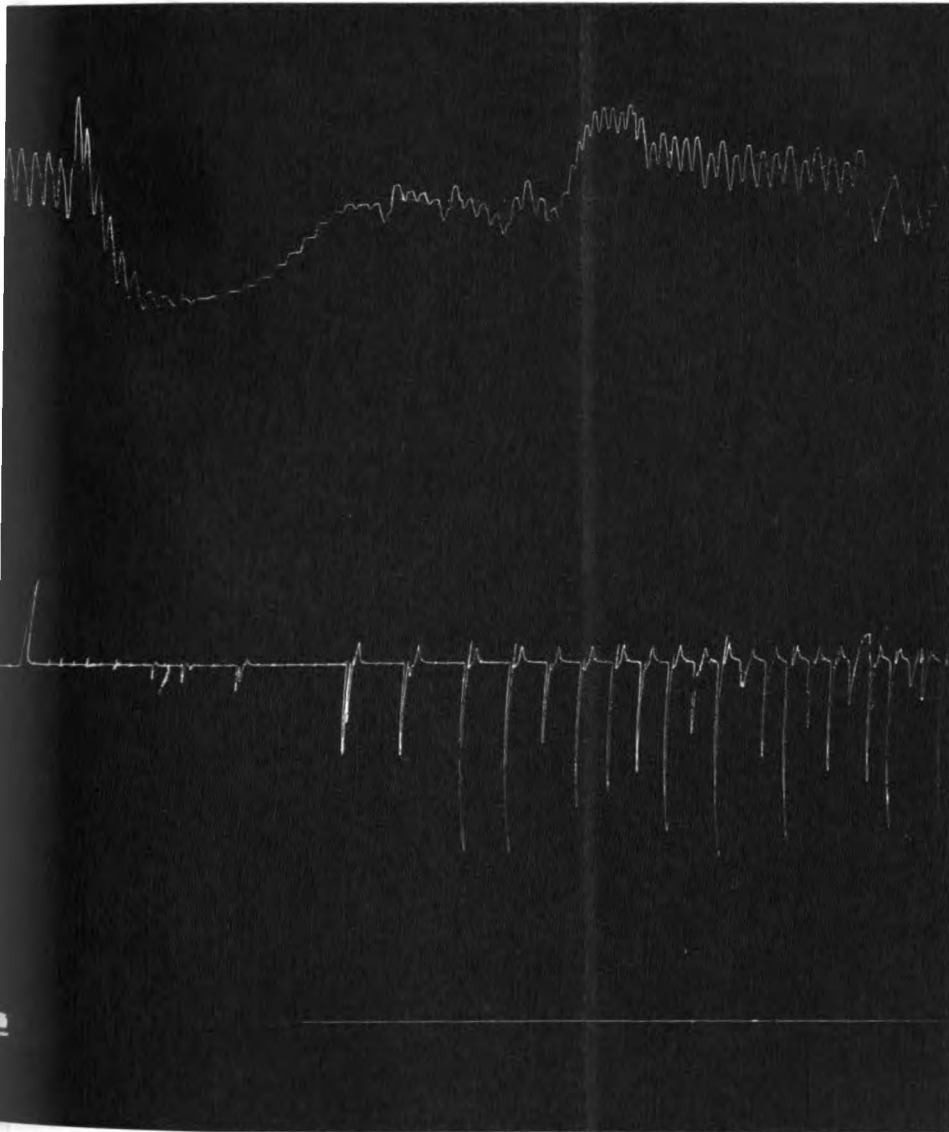


Première application de la tension

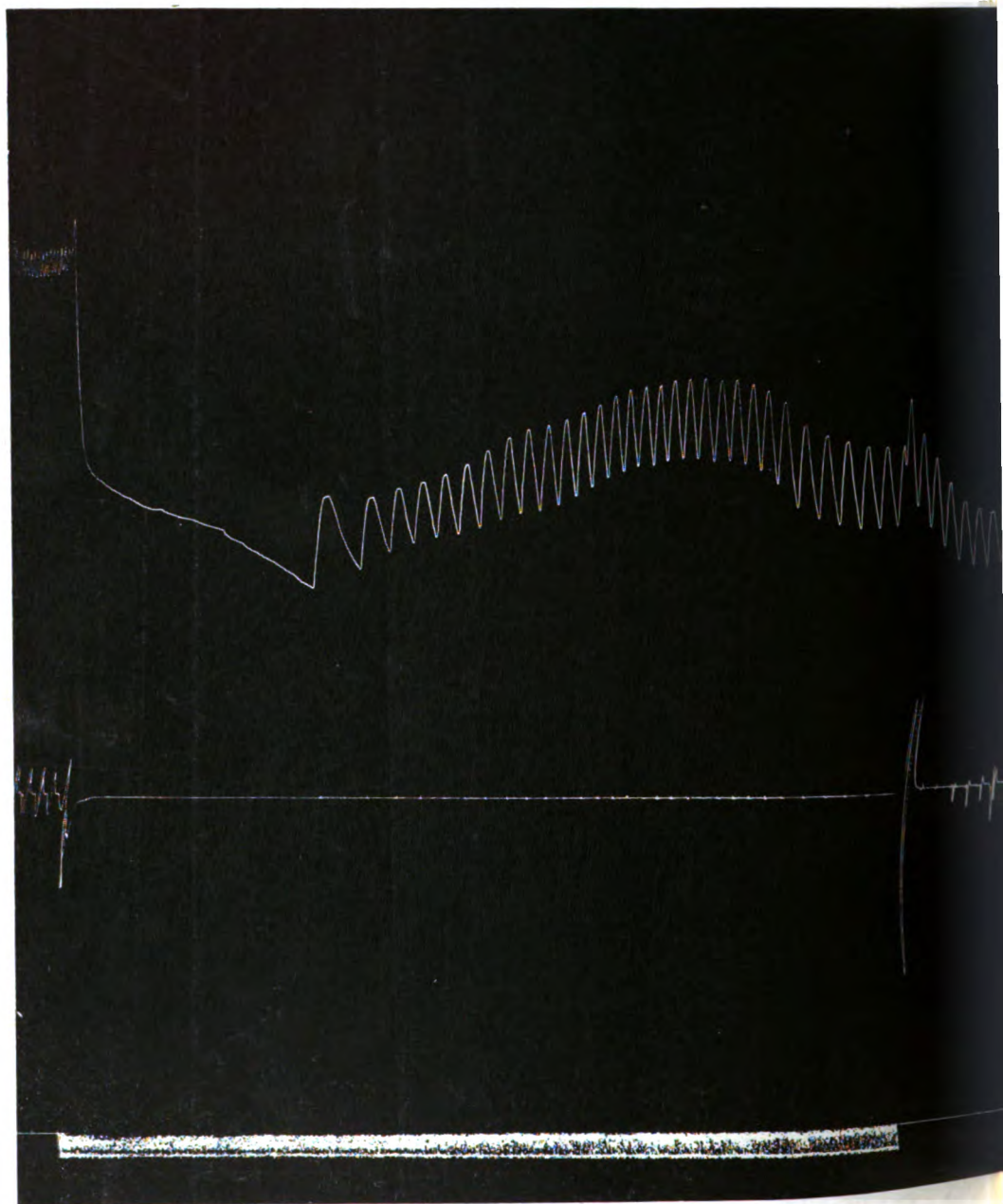
$U' = 1100$ volts. $I = 0,10$ ampère. $T = 118$ secondes. $R_{add} = 10000$ ohms.

Pl. XVIII.

met du crâne et sous le menton. Courant alternatif : fréquence 40.

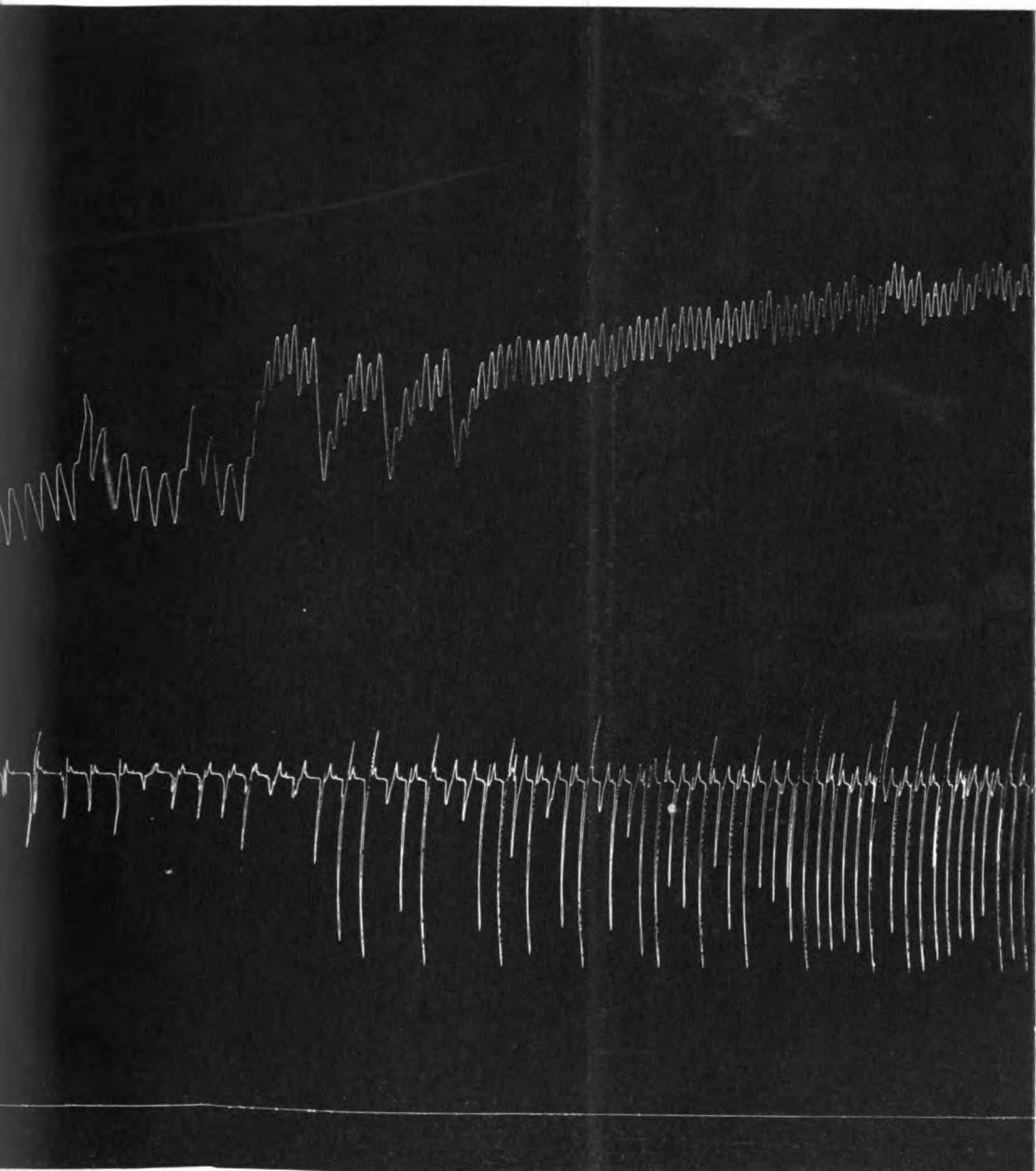


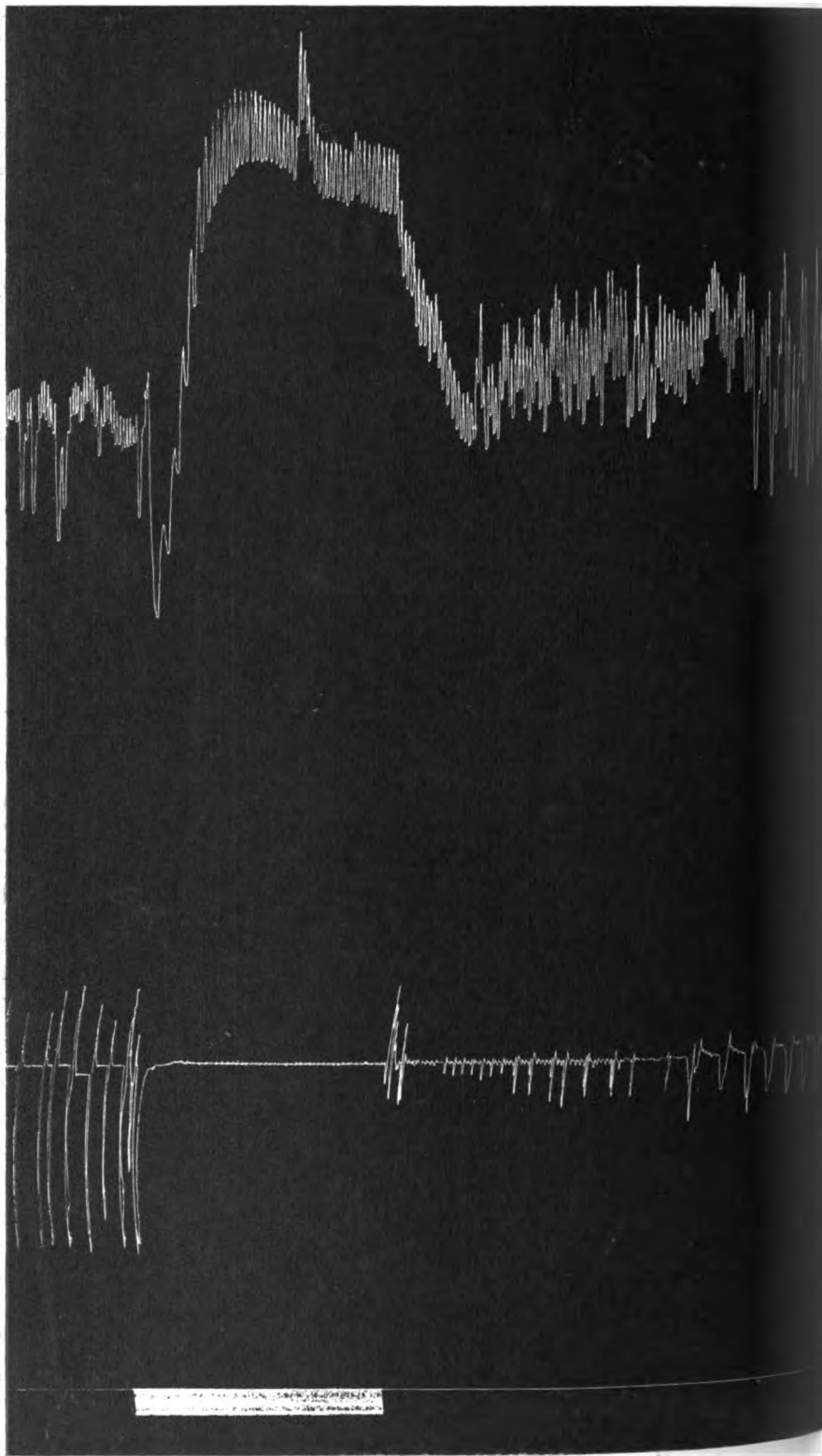
18 (*suite*). Chienne pesant 11,5 kg. Chloralosée. Electrodes : sur



Deuxième application de la tension :
Mêmes conditions que précédemment.

Le sommet du crâne et sur le menton. Courant alternatif : fréquence 42.





Première application de la tension:

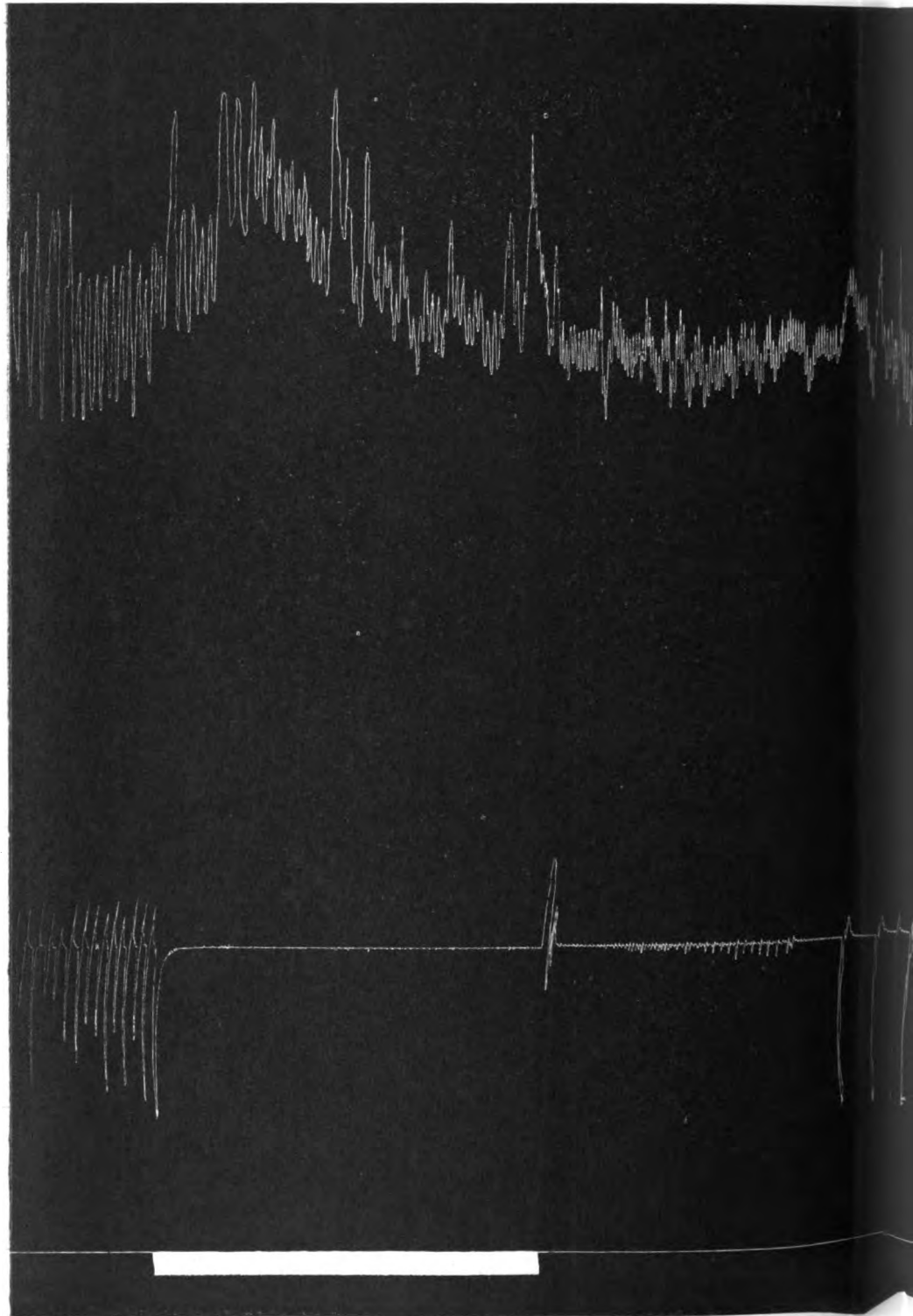
$U = 1080$ volts. $I = 0.385$ ampère. $T = 0.35$ secondes.

$R_{add} = 2500$ ohms.

loralésé. Electrodes : sur le sommet du crâne et

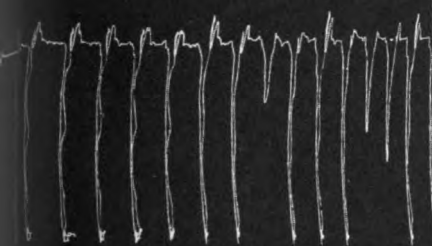


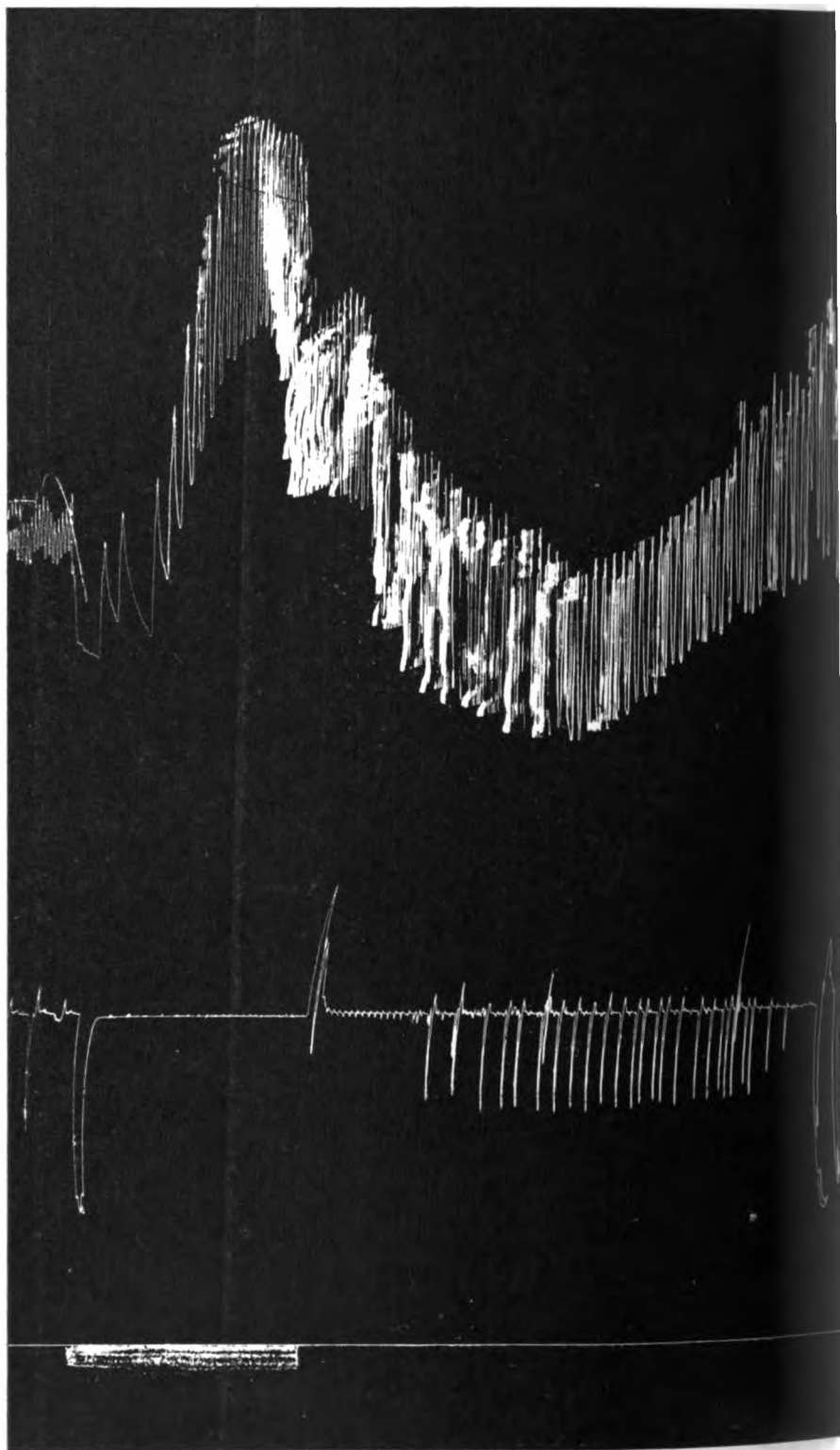
Deuxième application de
 $U' = 1090$ volts. $I = 0,417$ ampère
 $R_{add} = 2500$ ohms



Troisième application de la tension :
Mêmes conditions que précédemment.

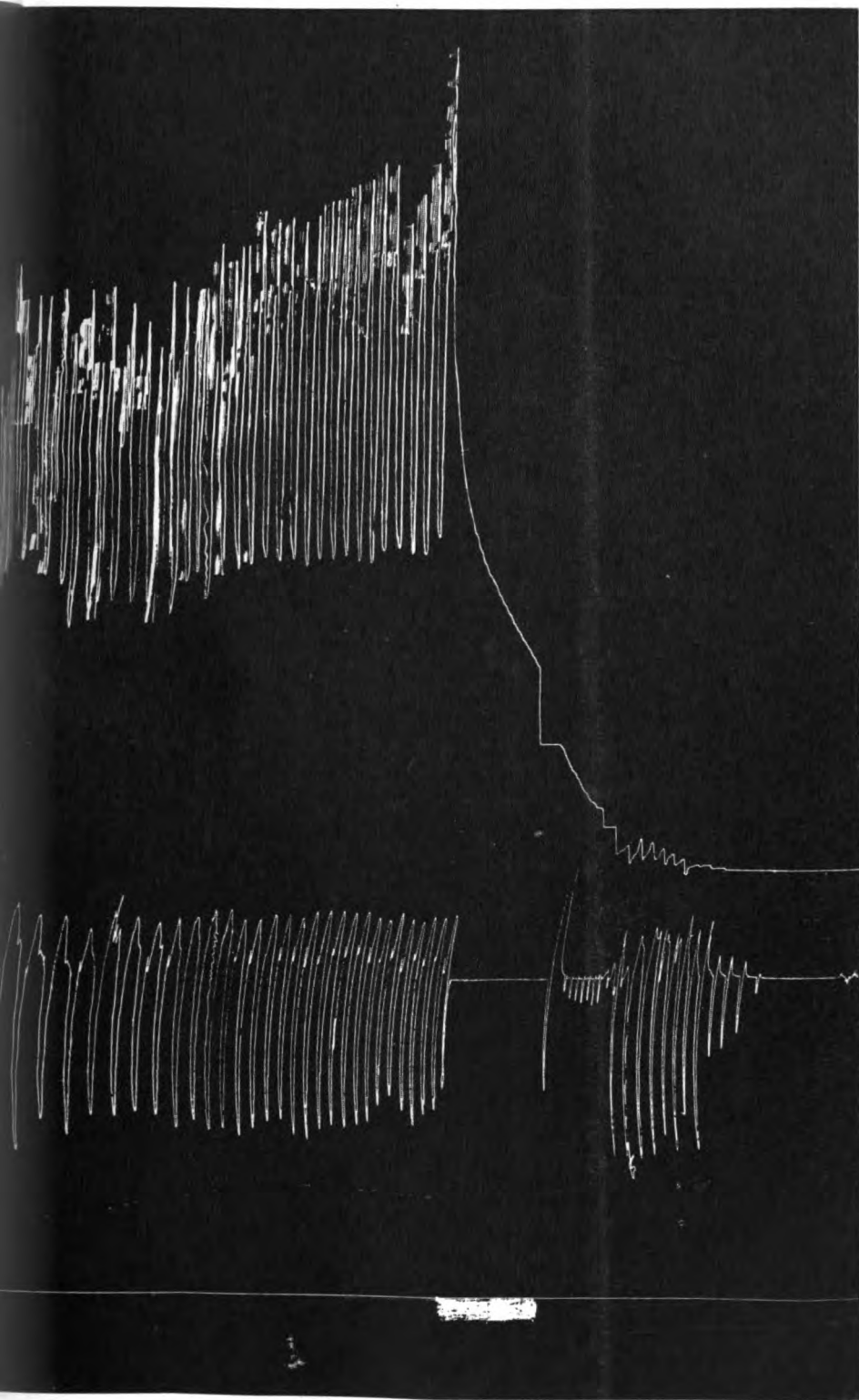
uite). Chien pesant 24 kg. Chloralosé. Cou





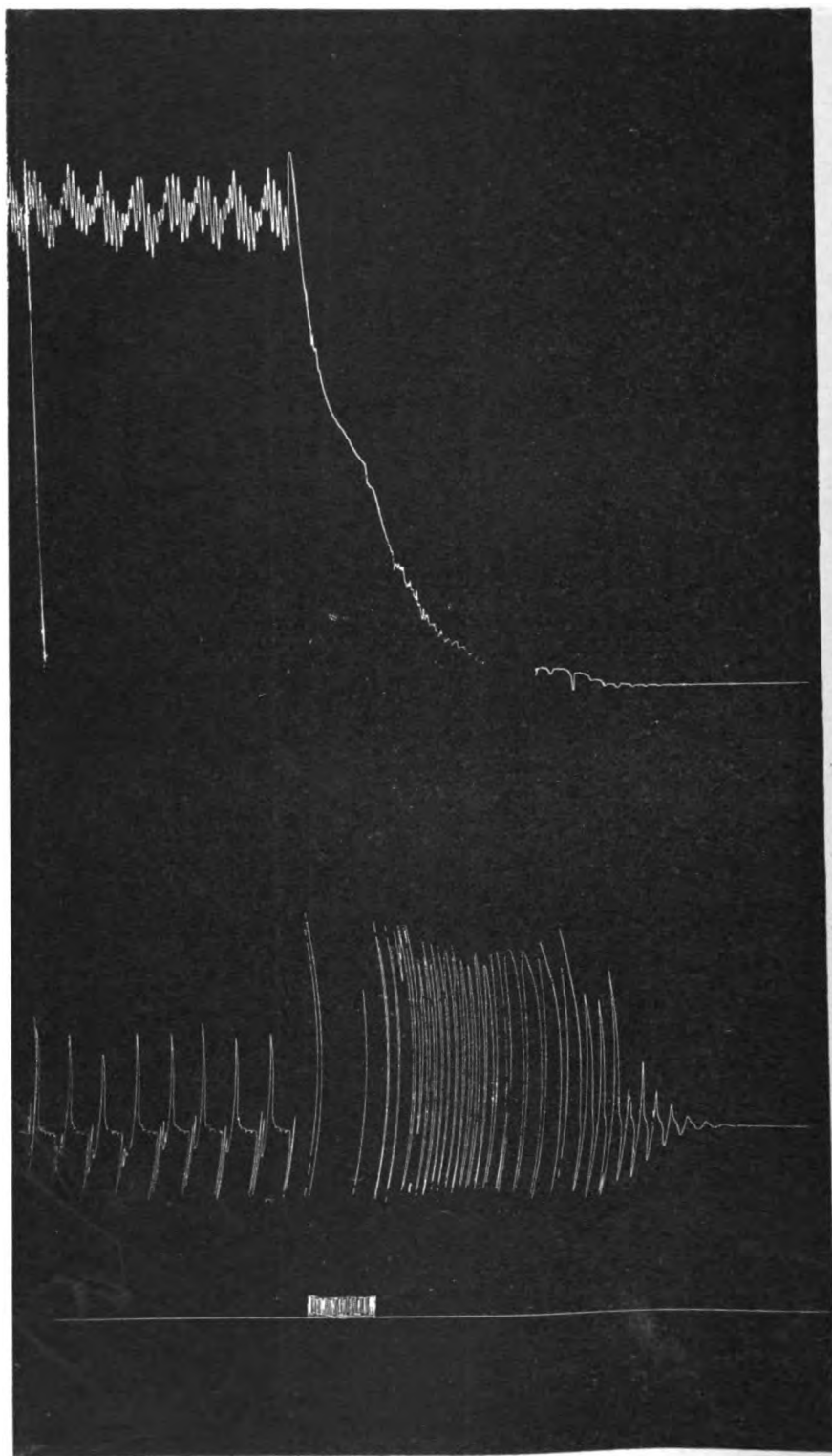
Première application de la tension :
Electrodes : sur le sommet du crâne et sous le menton.
 $U' = 1100$ volts $U = 200$ à 150 volts.
 $I =$ à $0,400$ ampère. $T = 3^s$ secondes.
 $R_{add} = 2500$ ohms.

Courant alternatif : fréquence 42.



Deuxième application de la tension :
 Electrodes : pattes antérieures et postérieures droites.
 $U' = 1100$ volts. $U =$ à 170 volts.
 $I = 0,190$ à $0,300$ ampère. $T = 15$ secondes.
 $R_{add} = 5000$ ohms.

35. Chien pesant 16,1 kg. Chloralosé. Électrodes : patte antérieure gauche
et patte postérieure droite. Courant alternatif : fréquence 75 p. s.



Application de la tension.

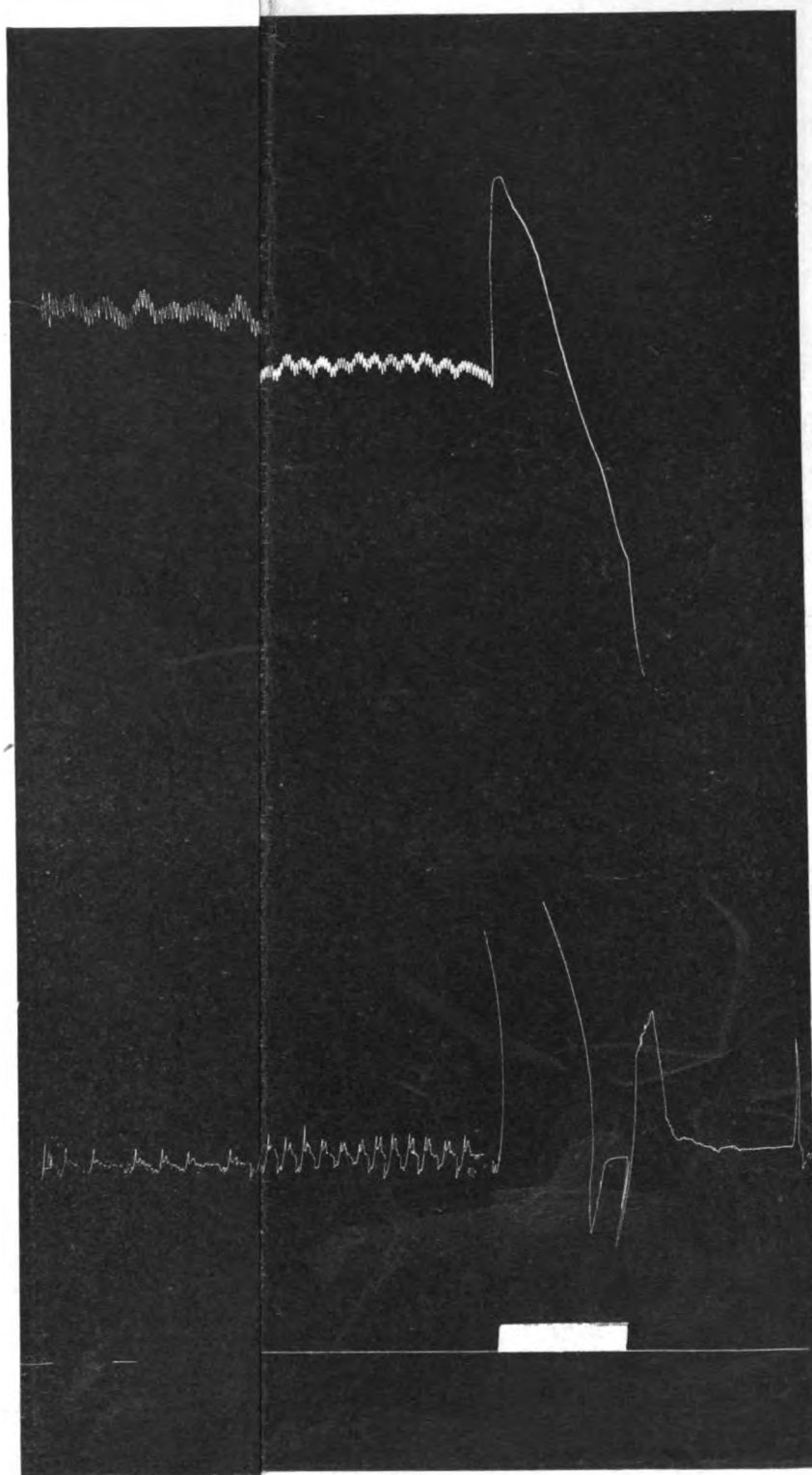
$U = 100$ volts.

$I = 0,11$ ampère.

$T = 10$ secondes.

$R_{add} = 0$ ohm.

quence 27 p : s.



Première

$U = 73$ volts. I

Deuxième application de la tension.

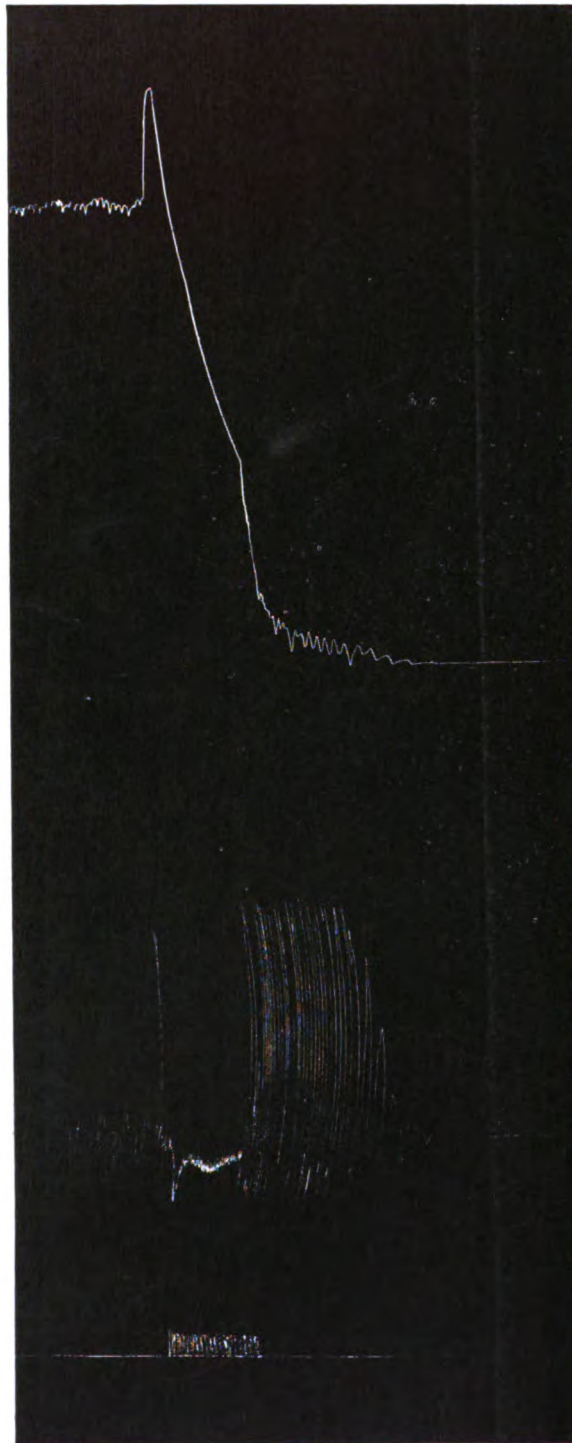
$U = 73$ volts. $I = 0,080$ ampère. $T = 20$ secondes.

$R_{add} = 0$ ohm.

29. Chien pesant 11,5 kg. Chloralosé.

Electrodes : patte antérieure gauche et patte postérieure droite.

Courant alternatif : fréquence 12,5.



Application de la tension :

$U = 78$ volts. $I = 0,113$ ampère.
 $T = 12$ secondes. $R_{add} = 0$ ohm.

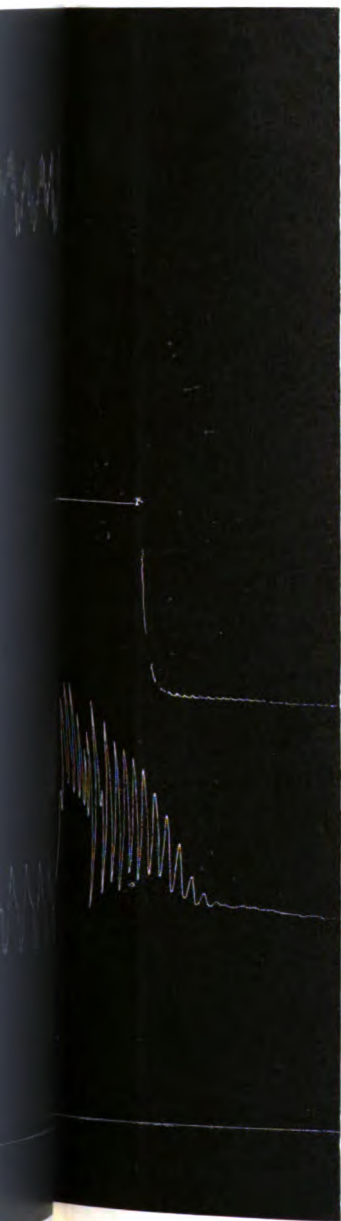
39. Chien pesant 17,5 kg.
 Electrodes : patte antérieure gauche et patte postérieure droite.
 Courant alternatif : fréquence 12,5.



Application de la tension :

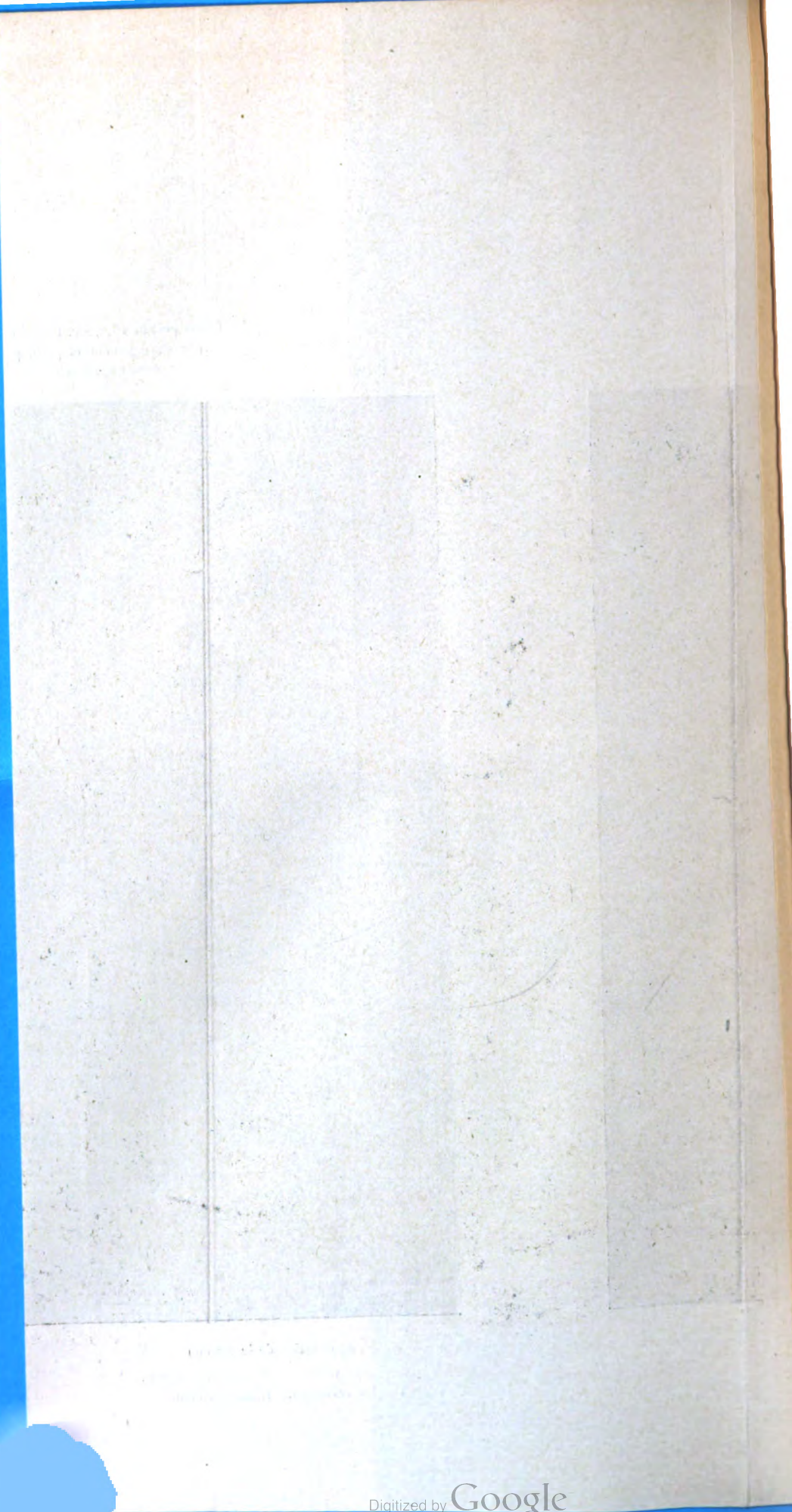
$U = 37,3$ volts. $I = 1,3$ ampère.
 $T = 10$ secondes. $R_{add} = 0$ ohm.

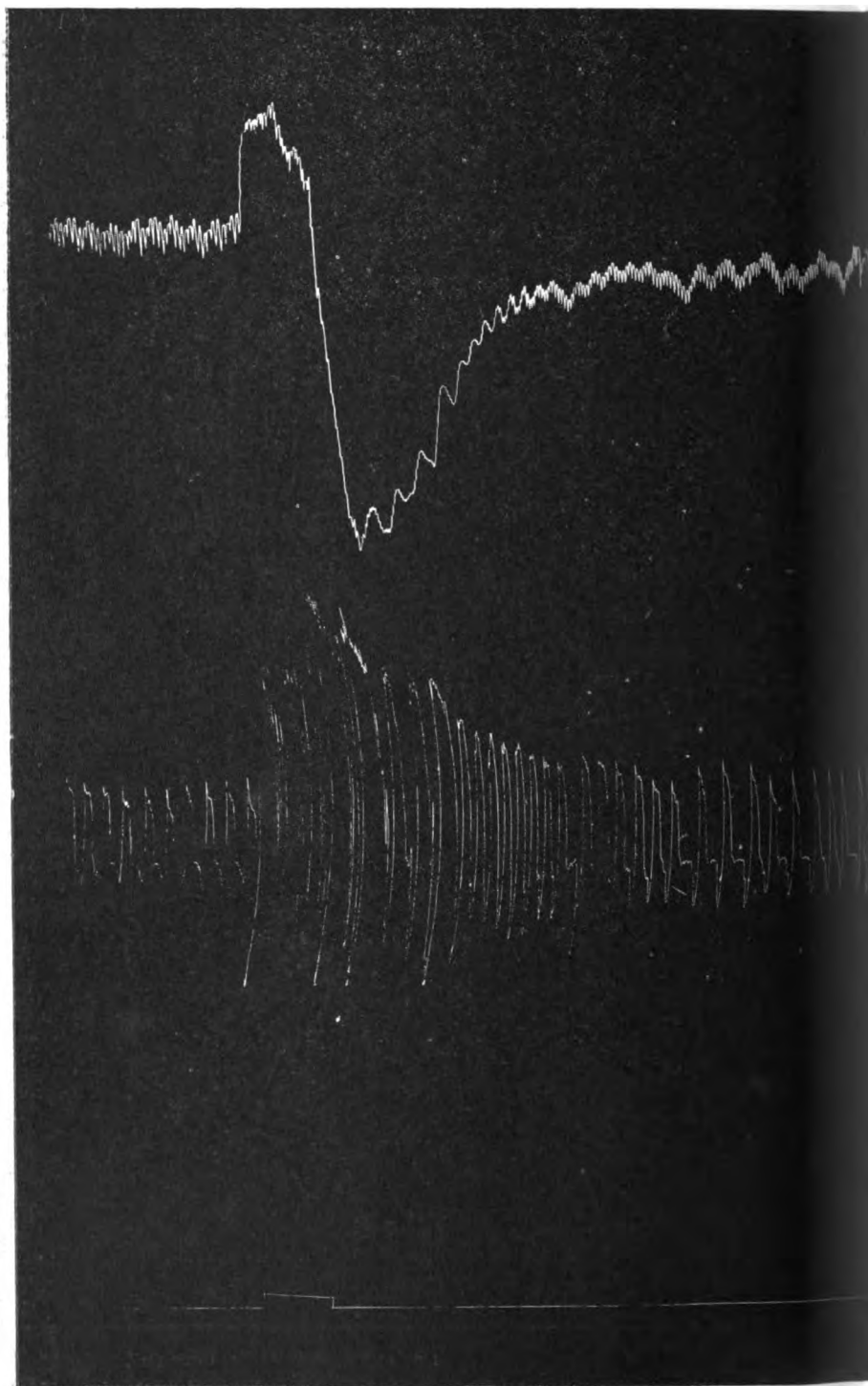
0.040 kg. Chloralosé.
 des : patte ~~gauche~~ et patte postérieure droite.
 continu.



1 :
 Ampère.
 = 10⁻³ hm.
 = 10⁻³ hm.

$U =$
 $T =$





Première application de la tension :

$U = 115$ volts. $I = 0,245$ ampère. $T = 10$ secondes.
 $R_{add} = 0$ ohm.

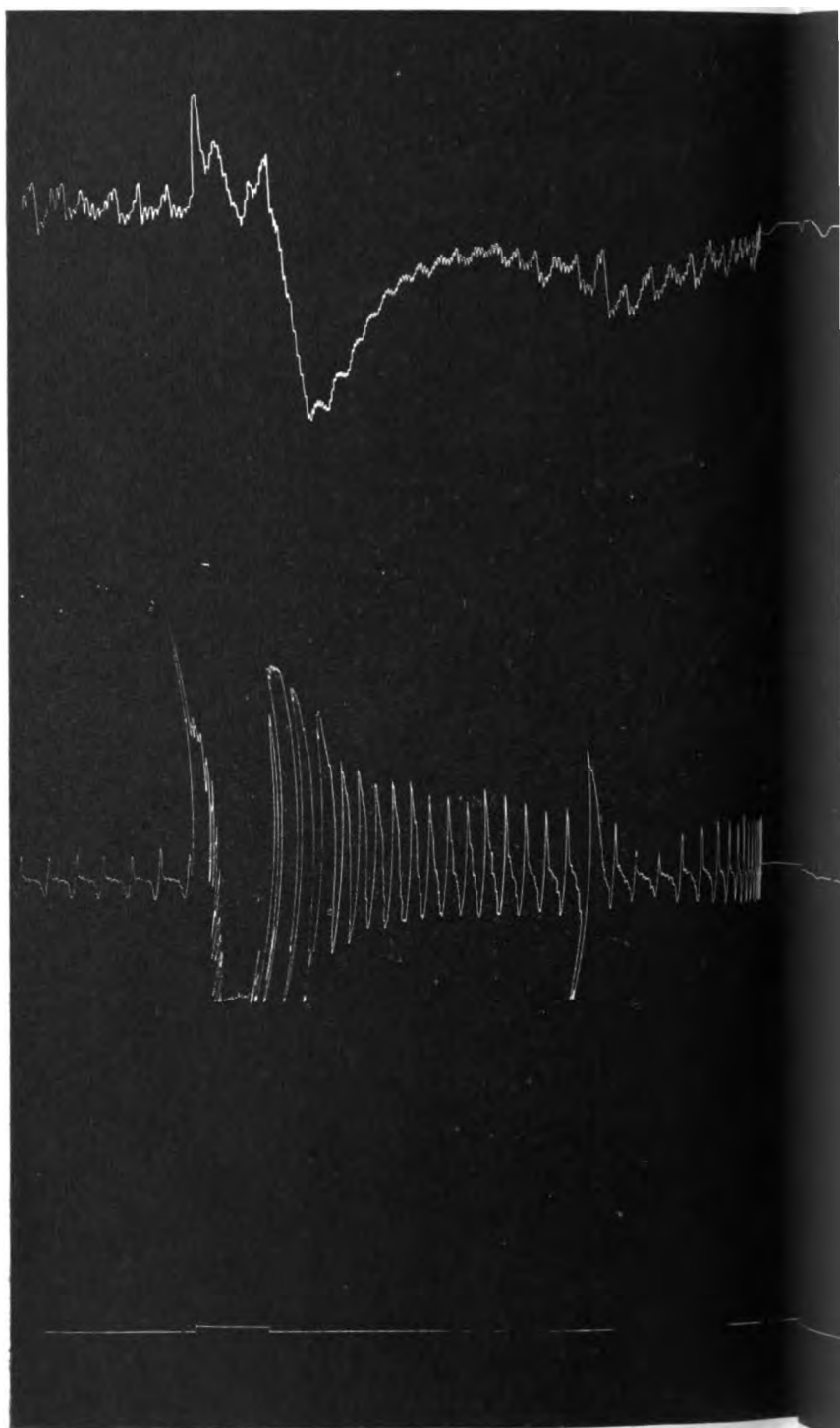
26 kg. Chloralosé. Électrodes : pat



Deuxième application de la

$U = 133$ volts. $I = 0,338$ ampère.

$R_{add} = 0$ ohm.



Première application de la tension :

$U = 149$ volts. $I = 0,207$ ampère. $T = 10$ secondes.
 $R_{add} = 0$ ohm.

1.

kg. Chloralose. Electro

Deuxième a
 $U = 162$ volts. $I =$

BULLETIN
DE LA
SOCIÉTÉ INTERNATIONALE
DES
ÉLECTRICIENS.

SOMMAIRE.

Compte rendu de la réunion mensuelle de novembre 1911 : Admission de membres titulaires, p. 504.
— Membres décédés, p. 504. — Don au Laboratoire, p. 504. — L'éclairage au néon (M. G. Claude), p. 505.
OUVRAGES OFFERTS, p. 524.

COMPTE RENDU

DE LA

RÉUNION ORDINAIRE MENSUELLE

du mercredi 8 novembre 1911 (1).

PRÉSIDENCE DE M. BRUNSWICK, VICE-PRÉSIDENT.

La séance est ouverte à 8 h 35 m du soir.

Le procès-verbal de la dernière réunion mensuelle est adopté.
Il est donné connaissance des Ouvrages offerts à la Bibliothèque

(1) La Société n'est pas solidaire des opinions émises par ses Membres dans les discussions, ni responsable des Notes ou Mémoires publiés dans le *Bulletin*.

(voir p. 524), des dons pour le Laboratoire et des demandes d'admission suivantes :

Brey (Paul-Léon), Ingénieur à la *Compagnie des Chemins de fer de l'État*, 31, rue du Vieux-Versailles, à Versailles (Seine-et-Oise). — Présenté par MM. Janet et Chaumat.
Foltz (J.), 22, rue des Chartreux, à Vernon (Eure). — Présenté par MM. Pacault et Pichon.

Fourcault (Didier-Léon), Ingénieur, Professeur à l'*Association philotechnique*, 15 bis, rue Blomet, à Paris. — Présenté par MM. Delamare et Laboureur.

Moulinier (Gustave), 56, avenue Gambetta, à Béziers (Hérault). — Présenté par MM. de Valbreuze et Sabourain.

Smoular (Michel), Élève de l'*École d'Électricité de la rue Violet*, 1, rue Jacquemont, à Paris. — Présenté par MM. E. Guillon et Sogno-Lafongt.

Ces candidats sont élus Membres titulaires de la Société internationale des Électriciens.

M. le PRÉSIDENT fait part du décès de MM. *Bergen, Bouchède, Galibert, Mercadier, Piroelle, A. Rousseau* et *Troost*; il en exprime les regrets de la Société et rappelle l'importance des travaux de MM. Mercadier et Troost.

Des remerciements sont adressés aux auteurs des dons suivants pour le Laboratoire central d'Électricité :

M. Eug. Sartiaux, 1230 fr;
Société industrielle des Téléphones, un régulateur Routin.

L'ordre du jour appelle les Communications techniques.

L'ÉCLAIRAGE AU NÉON.

M. G. CLAUDE. — « Messieurs, s'il est une question qui, par l'énormité de ses débouchés, soit capable d'exciter l'ingéniosité des chercheurs, c'est à coup sûr celle de l'éclairage.

» Pourtant, et c'est une chose fort curieuse, dans l'immense suite d'efforts qui ont été tentés sur ce sujet, pas un, pour ainsi dire, au moins jusqu'en ces dernières années, n'avait été donné en dehors d'une direction unique : jusqu'en ces dernières années, il semblait vraiment que l'industrie humaine fût condamnée à tirer la lumière, de toute éternité, du principe immuable qui consiste à porter un support matériel à une température aussi élevée que possible.

» Cependant, Messieurs, vous savez que ce principe est entaché de deux défauts primordiaux. D'une part, la proportion de l'énergie dépensée qui apparaît sous forme de radiations utiles est excessivement faible. Dans un travail récent, MM. Buisson et Fabry ont établi que la production d'une bougie jaune requiert théoriquement moins de 0,02 watt : malgré tous les progrès récents, le rendement des sources d'éclairage est donc tout à fait au bas de l'échelle des inventions humaines, et, par comparaison, la machine à vapeur elle-même est une merveille.

» D'autre part, l'éclat considérable des sources auxquelles on est ainsi conduit entraîne d'autres inconvénients : espacement des foyers, imperfection de distribution lumineuse qui en résulte et, surtout, fatigue considérable causée par les sources à grand éclat sur l'organe si délicat de la vue.

» Je sais bien qu'avec nos tendances très légitimes vers une meilleure utilisation de l'énergie, nous négligeons volontiers le second défaut au regard du premier, et que plus nous allons, plus nos foyers sont aveuglants, mais de meilleur rendement. Pourtant, la réalité doit nous rappeler à une plus saine appréciation des choses. Elle nous montre, en effet, que l'obtention de la lumière

diffuse est chose si précieuse qu'on n'hésite pas, pour la payer à perdre toute l'économie réalisée grâce au rendement meilleur en enveloppant les sources de grand éclat de verres absorbants qui retiennent souvent 40 pour 100 de la lumière émise. Nous voyons même, avec l'éclairage renversé, une formule bien plus coûteuse encore. Ici, c'est quelquefois de plus de 50 pour 100 qu'il faut payer l'obtention d'une lumière réellement diffuse, d'un éclairage sans ombres, et ceux qui en usent n'estiment pas payer trop cher les qualités éminemment reposantes de ce mode d'éclairage.

» Ainsi, les deux défauts de nos sources, éclat fatigant et mauvais rendement, sont du même ordre d'importance et cette constatation est fort décourageante, elle nous interdit tout espoir d'améliorer beaucoup la situation actuelle, car ces deux défauts sont d'ordre opposé et tout progrès acquis dans le rendement par une élévation de température entraîne dans l'éclat une nouvelle aggravation.

» Or, est-elle si réellement inéluctable, notre barbare formule? A cette question, la nature elle-même nous donne la réponse : l'exemple des vers luisants et des lampyres est là pour nous prouver que l'expression de *lumière froide* ne couvre pas une conception absurde. Ici, le rendement s'élève, paraît-il, à des valeurs fantastiquement éloignées des pauvres résultats de notre industrie, et cela simplement parce que l'énergie dépensée pour faire de la lumière apparaît toute dans cette lumière au lieu de s'épuiser en mille radiations inutiles. De plus, dans cette voie, l'inutilité évidente de concentrer dans un petit volume tout l'effort dépensé, pour augmenter la radiation utile, fait apparaître la possibilité de sources lumineuses de grande surface, donc de très faible éclat. Les deux inconvénients primordiaux de l'éclairage moderne disparaissent ainsi, et c'est sans doute dans cette voie que se trouvera la formule de l'éclairage de l'avenir.

» Cette voie, on sait comment jusqu'ici on a tenté de la frayer. Le tube de Geissler a paru en fournir les moyens. Devant la beauté des phénomènes qu'il met en jeu, on a cru trop vite le problème en bonne voie. « Si l'on vient à toucher ces tubes enflammés, disait-on, » c'est avec surprise qu'on les trouve presque froids, et c'est

» effectivement de la lumière froide qu'ils nous dispensent. » En fait, la réalité est moins séduisante : ce qu'on oubliait volontiers, c'est que ces rayons si jolis n'ont qu'une intensité bien faible : si l'on avait pu, sans démolir le tube, lui faire rendre une lumière comparable à celle de nos sources usuelles, on ne l'eût pas trouvé froid, on l'eût trouvé brûlant.

» Et l'Américain Moore s'en est bien aperçu. Quand, après notre compatriote Witz et d'autres, il s'est attaqué au problème de rendre pratique ce mode d'éclairage, quand, au prix d'une longue suite d'efforts méritoires, il y est parvenu, les meilleurs résultats lui ont été fournis par l'azote, et c'est seulement au plus à 1,7 watt par bougie décimale qu'il est arrivé. Cela n'a évidemment rien de révolutionnaire, encore qu'avec l'éclairage Moore le problème de la diffusion de la lumière, au contraire, reçoive une admirable solution.

» Pourtant, les résultats de Moore sont très instructifs. Si médiocre que l'azote apparaisse d'après ces essais, il est encore meilleur que l'acide carbonique, qui demande plus de 2 watts pour produire la bougie, et celui-ci est admirable devant l'hydrogène, qui réclame 5 fois plus !

» Ces différences n'ont rien pour nous surprendre si nous nous rappelons le mécanisme si curieux de l'excitation de la luminescence des gaz par le passage du courant. Sans faire d'hypothèse sur la nature exacte de ce mécanisme, rappelons que celui-ci a pour effet de provoquer dans les gaz raréfiés des vibrations spéciales à chaque espèce d'atomes et caractérisées par l'émission d'un certain nombre de radiations isolées, immuables pour chaque gaz. Celles de ces radiations qui agissent sur notre œil sont mises en évidence par les différentes raies du spectre du gaz en question. Si presque toutes ces vibrations sont situées dans le spectre visible et spécialement dans cette région jaune du spectre à laquelle notre œil est particulièrement sensible, le rendement sera excellent ; si au contraire beaucoup de ces radiations sont hors du spectre visible, tant du côté de l'infra-rouge que de l'ultra-violet, le rendement sera détestable — et c'est le cas de l'hydrogène — tandis que l'azote se trouve vraisemblablement à cheval entre les deux. C'est donc une question d'espèces, et il n'y a sans doute aucune impossibilité à concevoir

un gaz hypothétique qui ne donnerait que des radiations jaunes, et, par ainsi, un rendement merveilleux; mais si nous ne pouvons guère supposer qu'un pareil gaz existe, tout au moins en doit-il exister des approximations. Eh bien, ces approximations, il n'est certainement pas de besogne plus utile que les rechercher, car l'industrie moderne nous montre par ses victoires les plus brillantes que le vrai rôle de l'ingénieur n'est pas de violenter la nature, n'est pas de vouloir plier à un effet donné une matière qui y est rebelle : ce rôle, c'est bien plutôt de produire cet effet avec le minimum d'effort, grâce à l'utilisation des propriétés spécifiques mystérieusement dévolues à telle ou telle substance.

» Or, si les gaz usuels ont fait l'objet d'investigations sérieuses, il en est toute une classe qu'on n'avait pu étudier que très superficiellement, en raison de la difficulté de se les procurer : ce sont les *gaz rares* de l'air, qui, comme vous savez, ont été découverts par Ramsay. Cet examen, d'ailleurs, avait précisément montré que les gaz en question sont très remarquables au point de vue de leur spectre. Aussi, préoccupé depuis longtemps de cette question de la lumière froide, je n'ai pas manqué de profiter de l'occasion que m'offraient mes travaux sur la liquéfaction de l'air pour essayer de les produire en abondance et de voir de plus près si parmi eux ne se trouverait pas le phénix en question.

» Je ne voudrais pas vous imposer ici, Messieurs, une trop longue dissertation sur la liquéfaction de l'air. Qu'il me suffise de vous dire que parmi ces gaz de Ramsay, deux des plus intéressants, le *néon* et l'*hélium*, se distinguent de leurs compagnons par une aptitude beaucoup moins grande à la liquéfaction. En poussant donc de façon très méthodique, très progressive, la condensation de l'air, j'ai réussi à obtenir ces deux gaz sous la forme d'un résidu de liquéfaction qui les livre pour ainsi dire à l'état de pureté. Ce n'est donc pas par une distillation fractionnée, comme on le répète trop souvent, mais par l'opération précisément inverse, que j'obtiens ces produits. Et pas en petites quantités, comme vous pourriez le croire. Il n'y a pas beaucoup de néon dans l'air. Il n'y en a guère qu'une partie sur 66 000, et c'est à grand'peine que, jusqu'à mes essais, Ramsay en avait préparé quelques centimètres cubes. Or, telle est la puissance de production des appareils qui

séparent aujourd'hui les gaz de l'air pour les besoins de l'industrie qu'un seul de mes appareils, d'une puissance de production de 50 m³ d'oxygène à l'heure, produit en même temps un courant de gaz rares qui au bout de la journée représente plus de 100 litres de néon. Ceci ne vous paraît peut-être pas encore énorme, mais je vous aurai, je pense, définitivement rassurés sur la sécurité de l'industrie future de l'éclairage au néon, quand je vous aurai dit que ces 100 litres produits par un seul de mes appareils suffiraient pour fabriquer chaque jour 1000 tubes luminescents de 1000 bougies chacun !

» C'est donc à la tête d'un véritable sous-produit industriel que je me suis trouvé, et j'aurais manqué à tous mes devoirs si je n'avais pas essayé de lui trouver des applications. C'est, bien entendu, du côté de la luminescence que je me suis tourné. Si superficiel en effet qu'ait été, et pour cause, l'examen de ces gaz au début de mes travaux, j'ai déjà dit qu'une des premières choses qu'il avait mis en lumière, c'est la beauté de leur spectre. La première fois que, d'un tube de Plücker chargé de néon, j'ai vu se dégager la belle lumière couleur feu [que je vous montre ici, que j'ai vu dans le spectroscope cette lumière se résoudre en un superbe spectre, j'ai été enthousiasmé. Ce spectre est formé de nombreuses raies éclatantes dans le rouge et le jaune; il comprend également trois belles lignes vertes, mais il s'éteint au delà.

» Cette absence du bleu et du violet est évidemment fort regrettable; pourtant, par compensation, cette répartition si abondante des raies du spectre au voisinage de la région la plus active pour notre œil est déjà de bon augure pour le rendement lumineux qu'on peut espérer.

» D'ailleurs, au cours de mes recherches, d'autres constatations faites de divers côtés avec le néon produit par mes appareils venaient m'encourager dans mon dessein. On savait déjà que le néon s'illumine avec une grande facilité par la décharge électrique. Sir J. Dewar, en effet, a réalisé des tubes à néon sans électrodes qui s'illuminent spontanément dès qu'on les place aux ventres des interférences hertziennes, de sorte que ces singuliers détecteurs permettent de mesurer avec la plus grande facilité la longueur d'onde des installations de télégraphie sans fils. Et comme la lon-

gueur d'onde est directement liée à la self-induction et à la capacité du circuit oscillant, il en résulte qu'un simple tube à néon fournit un moyen aussi excellent qu'inattendu pour mesurer soit une capacité, soit un coefficient de self-induction.

» D'autre part, avec le néon que, sur sa demande, j'avais envoyé à Ramsay, le professeur Collie, son collaborateur, ne tardait pas à faire une observation éminemment intéressante. Une éprouvette dans laquelle du néon bien pur avait été recueilli sur du mercure s'illuminait à chaque secousse d'une lueur orangée fort nette sur tout le pourtour du niveau du mercure. On démontre aujourd'hui cette remarquable propriété à l'aide d'un tube de verre scellé dans lequel quelques globules de mercure peuvent être agités au sein d'une atmosphère de néon sous une pression de 20 cm à 30 cm de mercure. Si l'on agite ce tube dans l'obscurité, il se remplit d'une véritable pluie de feu !

» De son côté, notre savant compatriote M. Bouty, continuant sur le néon que je lui avais donné ses belles recherches sur la rigidité diélectrique des gaz, remarquait avec stupéfaction que la cohésion électrique de ce gaz est extraordinairement faible, bien plus faible que celle que devrait lui attribuer sa place dans la série des gaz rares. Si nous supposons en effet qu'il faille une différence de potentiel 1000 pour traverser une certaine couche d'air, il n'en faut déjà plus que 40 pour traverser une couche égale d'hélium à la même pression, mais c'est 13 qui suffisent avec le néon, dans les conditions spéciales des essais de M. Bouty ! Cette facilité extrême avec laquelle le néon se laisse traverser par la décharge est, bien entendu, la cause du phénomène de Collie, l'électrisation des parois du verre par les globules de mercure suffisant à provoquer une décharge dans le gaz.

» Malgré ces prémices si favorables, les débuts de mes recherches n'ont pas été heureux. Je vous ai montré tout à l'heure la lumière du néon, et vous avez pu remarquer que cette lumière est très riche en ces rayons rouges, dont la lumière du mercure est au contraire si pauvre. De là vient assez naturellement à l'esprit l'idée qu'on pourrait peut-être corriger la lumière... regrettable des tubes à mercure en introduisant dans leur atmosphère un peu de néon. C'est cette idée simpliste, déjà indiquée par Cooper Hevitt lui-

même, qui a servi de guide à mes premiers efforts et n'a abouti du reste qu'à un complet échec. Il est le plus souvent très difficile d'arriver à faire vibrer ensemble deux espèces de molécules de périodes de vibration nécessairement différentes, car très généralement, l'une des deux radiations est très prédominante. Il semble que si les circonstances, pression, densité de courant, proportion, favorisent l'une des espèces de molécules, les vibrations de celle-ci agissent pour contrarier jusqu'à les étouffer les vibrations de période différente de l'autre.

» Quoi qu'il en soit, on ne peut arriver à de bons résultats en essayant de faire vibrer ensemble avec des amplitudes comparables le mercure et le néon, et le meilleur moyen pour obtenir la correction voulue consiste sans doute à produire par deux lampes séparées les deux radiations, comme je le montrerai tout à l'heure.

» J'ai été plus heureux, par contre, et malgré des difficultés assez inattendues dans la résolution desquelles les services de MM. Létang et Chatelain m'ont été très précieux, j'ai réussi presque au delà de mes espérances dans la voie de l'utilisation du néon dans de simples tubes de Geissler analogues aux tubes Moore. Ce n'est pas seulement le point de vue technique que j'ai pu résoudre dans des conditions excellentes, ce sont aussi les idées pessimistes que j'avais sur la qualité de la lumière produite que j'ai dû avec plaisir rectifier par la suite. Il me paraissait en effet tout d'abord que si cette lumière était admirable pour éclairer le cabaret de l'Enfer, elle était beaucoup trop rouge pour pouvoir être utilisée industriellement, à moins d'une sérieuse correction. Or, vous verrez tout à l'heure avec quelle curieuse facilité on s'accoutume à cette lumière, en sorte qu'après quelques instants, il n'en reste plus qu'une impression très chaude de *jaune doré*. Je dois même dire que beaucoup de personnes ont été jusqu'à m'affirmer qu'elles n'avaient pas encore vu d'aussi jolie lumière. Peut-être trouverez-vous tout à l'heure qu'elles exagéraient, mais quant à moi, je dois avouer que j'ai fini par me laisser convaincre.

» Pour arriver au but que je me proposais, j'ai rencontré, bien entendu, quelques difficultés.

» L'une des principales résulte d'une propriété regrettable du néon. Ce corps, si singulièrement apte à entrer en vibrations sous

l'effet du courant, se laisse réduire à l'impuissance avec une facilité déconcertante par des quantités très petites de certains gaz étrangers, comme l'azote et surtout l'hydrogène. Alors que ces gaz sont à cent coudées au-dessous de lui à cet égard spécial, quelques centièmes suffisent à annihiler le néon au point que leur spectre est seul visible, et qu'on ne parvient qu'à grand'peine à discerner dans la lumière émise quelques raies du néon. Or, cette sensibilité à l'action des gaz étrangers est telle qu'il serait tout à fait insuffisant d'introduire du néon très pur dans le tube luminescent, car les gaz occlus dans les électrodes et les parois du tube, dégagés par le passage du courant, feraient en quelques secondes tomber presque à rien le rendement lumineux. Voici un tube dans lequel j'ai introduit du néon à 98 pour 100 après avoir pris la précaution d'enlever par des purges répétées les gaz occlus dégagés par le passage du courant. Vous voyez combien est piteux son éclat, et vous n'y distingueriez, guère que le spectre de l'azote et celui de l'éternel gêneur des spectroscopistes, l'hydrogène.

» Pour arriver à réaliser pratiquement des tubes qui présentent, dans tout leur éclat et d'une manière indéfinie, la belle luminescence du néon, il m'a fallu imaginer un procédé de purification du gaz en quelque sorte sur place, à mesure du dégagement des impuretés par le passage même du courant. J'ai eu l'idée d'utiliser à cet effet, mais dans des conditions tout à fait spéciales, la remarquable propriété découverte par sir J. Dewar et que possède le charbon de bois d'absorber les gaz avec une extrême énergie aux températures très basses comme celle de l'air liquide. Cette propriété est en relation avec l'aptitude des différents gaz à la liquéfaction. Plus ils sont facilement liquéfiables, plus énergiquement ils sont absorbés : l'intervention du charbon paraît en somme consister à provoquer dans ses pores une sorte de liquéfaction dans laquelle l'action de la température serait complétée par celle des pressions élevées mises en jeu par les forces capillaires. Ainsi, à la température de l'air liquide, l'azote et l'oxygène sont absorbés, mais le néon et l'hélium le sont seulement très peu.

» Dewar a mis cette propriété à profit pour la séparation des gaz en faisant circuler ceux-ci, préalablement refroidis, au travers du charbon, lui-même refroidi par l'air liquide. Les gaz les moins

absorbables sont ainsi recueillis. Ce procédé, qui s'appliquerait difficilement à des gaz raréfiés, et qui nécessite de faire circuler les gaz traités en totalité au contact du charbon, n'était naturellement pas applicable à mon cas, où les gaz sont très raréfiés, doivent rester dans l'intérieur du tube et être débarrassés à chaque instant des impuretés nouvelles que dégage le passage du courant.

» J'ai espéré qu'avec des gaz raréfiés les phénomènes de diffusion seraient assez actifs pour conduire continuellement, du tube lumineux énorme qu'il s'agissait de former, vers un récipient de charbon soudé au tube et plongé dans l'air liquide, les différentes molécules de l'atmosphère du tube. Ces prévisions ont été réalisées. Au début, le tube est soigneusement purgé à l'aide de la pompe à vide des impuretés libérées par le passage de courants énergiques. Il est alors chargé de la quantité convenable de néon purifié et le charbon est plongé dans l'air liquide. Des absorbants convenables⁽¹⁾ peuvent être employés pour retenir l'hydrogène, que le charbon pourrait ne pas absorber complètement. Tout d'abord, la luminescence du néon est à peine sensible. Elle apparaît après quelques heures, mais le passage du courant pendant quelques instants la fait disparaître rapidement, pour reparaitre plus intense après quelque temps. Après plusieurs heures de cette laborieuse *formation*, le tube est terminé : la luminescence du néon apparaît et persiste désormais avec tout son éclat et le tube peut être séparé à la lampe du récipient à charbon. L'efficacité des phénomènes de diffusion qui interviennent ici⁽²⁾ est vraiment surprenante, mais il ne l'est que par suite de la raréfaction même, car la durée de la formation est essentiellement liée, entre autres choses, à la pression du néon et augmente rapidement avec elle.

» Voilà donc notre tube terminé. Mais pour que nous soyions avec lui en possession d'un outil vraiment industriel, encore faut-il que ses éléments constitutifs, et en particulier ses électrodes, répondent à certaines conditions, en dehors desquelles sa *durée* serait

(1) Électrodes oxydées par exemple.

(2) Aidés d'ailleurs par les dilatations correspondantes à chaque passage de courant, qui chassent vers le réservoir, dont le volume fictif est considérable, une bonne partie de l'atmosphère du tube.

tout à fait éphémère. Ce point peut vous sembler d'autant plus important que, comme vous le savez, les plus grandes difficultés que Moore a eues à surmonter lui sont précisément venues du fait qu'initialement ses tubes ne présentaient aucune durée. Moore a constaté, en effet, que par un phénomène assez singulier et dont le mécanisme n'a d'ailleurs pas été précisé, l'azote de ses tubes disparaissait rapidement, de sorte qu'après très peu de temps les tubes s'éteignaient. Et ses efforts pour rendre pratique ce mode d'éclairage ont été annihilés par ce fait surprenant, jusqu'au jour où, par un dispositif ingénieux, à l'aide d'une soupape électromagnétique d'une extrême sensibilité, il a réussi à faire rentrer dans le tube de l'azote puisé dans l'air extérieur, à mesure que disparaissait le gaz luminescent. D'après les affirmations plutôt surprenantes de Moore, ce phénomène d'absorption agirait avec une telle intensité que la soupape fonctionnerait deux fois par minute en introduisant chaque fois $\frac{1}{10}$ de la quantité de gaz présente dans le tube. Si l'on fait, d'après ces données, le calcul de la quantité d'azote dépensée par un tube de 50 m de long, on arrive à la quantité phénoménale de 200 litres par an. Si les tubes à néon étaient de pareils mangeurs, mes appareils producteurs n'y suffiraient pas.

» Dans mon cas, il est vrai, je pouvais espérer être plus favorisé. On ne voit guère, en effet, qu'une combinaison avec les électrodes qui puisse expliquer la disparition de quantités aussi considérables de gaz, et l'on sait que le néon appartient à la famille des corps réputés inertes par excellence, des corps du groupe de l'argon. En fait, cet espoir ne s'est pas confirmé; et si mes tubes ne se vidaient pas avec la vitesse fantastique indiquée par Moore, il n'en est pas moins vrai qu'après une montée rapide de la différence de potentiel aux bornes, les premiers d'entre eux papillottaient, puis s'éteignaient au bout de 5 ou 6 heures.

» Si je n'avais pu réussir à atténuer cette consommation, c'eût été la faillite de l'éclairage au néon, car outre que la rareté de ce gaz n'en permet pas une telle consommation, la pureté très grande que réclame ici le gaz luminescent rendrait sans doute illusoire le principe des rentrées perpétuelles par une soupape analogue à celle de Moore.

» J'ai donc étudié les choses de plus près, et je me suis proposé

de réduire l'absorption des gaz à une valeur négligeable. Pour cela, il m'a fallu tout d'abord en préciser le mécanisme. J'ai remarqué que les électrodes de mes premiers tubes, assez petites et soumises pendant le fonctionnement à un très fort échauffement, subissaient une vaporisation rapide qui recouvrait les parties avoisinantes du tube d'un dépôt métallique miroitant, détachable en écailles. Ce fait se produit d'ailleurs avec tous les gaz. Mais j'ai été très surpris de trouver qu'avec le néon, gaz inerte par définition, cette désintégration est bien plus rapide encore qu'avec tous les autres. Un tube de Plücker à néon, muni d'électrodes de platine, est platinisé entièrement au voisinage des électrodes après quelques minutes de fonctionnement.

» J'ai pensé que cette volatilisation des électrodes n'était peut-être pas étrangère à la disparition du néon dans mes tubes. Pour m'en rendre compte, j'ai traité les écailles détachées du tube par l'acide nitrique et j'ai obtenu à chaque expérience un volume d'environ 1 cm³ par gramme d'un gaz qui, introduit dans un tube de Plücker muni d'un minuscule récipient à charbon, m'a fourni comme je l'espérais le spectre très net du néon; de plus, ce à quoi je m'attendais moins, le spectre de l'hélium m'est apparu aussi, bien plus intense encore ! Des expériences ultérieures m'ont montré que la présence de l'hélium dans le métal n'est pas imputable, comme j'avais pu le croire, à une mystérieuse transmutation du néon en hélium, mais à une simple action sélective sur les faibles quantités d'hélium présentes dans le néon imparfaitement purifié. Sir W. Ramsay, qui a recommencé mes essais, est parvenu à la même conclusion.

» La partie non volatilisée des électrodes, par contre, ne m'a pas fourni de néon.

» Ainsi le problème s'éclaire : si le néon disparaît, c'est qu'il est capté par le cuivre volatilisé. La désintégration de l'électrode apparaît ainsi comme l'ennemi de la durée et c'est à la réduire qu'il faut s'attacher. Effectivement, en augmentant progressivement la surface des électrodes, j'ai réduit la vaporisation, ce qui d'ailleurs vérifie les observations de Granqvist, et, conformément à mes prévisions, j'ai eu la satisfaction de voir augmenter parallèlement la durée de mes tubes. Avec les électrodes actuelles, dont

la surface est, comme vous voyez, très grande, la durée obtenue dans des conditions normales est supérieure à 1000 heures pour des tubes de 5 m. Elle serait vraisemblablement plus grande pour des tubes plus longs, puisqu'il n'y a toujours que deux électrodes pour consommer le néon et que la provision de néon est beaucoup plus grande.

» Cette durée, tout à fait comparable, et même vraisemblablement très supérieure, dans de bonnes conditions, à celle des lampes à incandescence, a donc été obtenue avec une facilité inespérée sans aucun artifice, sans recharges périodiques ou continues : mes tubes sont des *sans-soupapes*, tout comme les plus huppées de nos automobiles.

» Le résultat est d'autant plus précieux que, durant le cours de sa longue existence, le régime du tube reste sensiblement constant. C'est tout au plus si la différence de potentiel aux bornes du tube passe dans ce laps de temps de 800 à 750, puis remonte à 800 volts par exemple, et il est parfaitement inutile de toucher une seule fois au réglage de la self-induction placée dans le circuit.

» *Conditions de fonctionnement.* — Voilà notre tube définitivement prêt; il est temps maintenant d'en étudier les conditions de fonctionnement. Remarquons tout d'abord que les tubes au néon, de même que les tubes Moore, ne s'accommodent, au moins actuellement, que du courant alternatif et doivent être branchés sur un transformateur élévateur de tension. Pour alimenter les abonnés des secteurs à courant continu, un organe de transformation du courant, par exemple une commutatrice, est donc nécessaire. Cette circonstance serait évidemment de nature à limiter beaucoup les applications de ce mode d'éclairage, car il n'est pas toujours possible de consentir à cette installation dispendieuse. Heureusement, grâce à la cohésion diélectrique si faible du néon, je ne désespère pas d'arriver à amorcer des tubes de faible longueur sur le courant continu.

» *Différence de potentiel aux bornes.* — Grâce à cette faible cohésion en tout cas, les différences de potentiel nécessitées par les tubes au néon sont remarquablement faibles. Les tubes de 6 m

qui fonctionnent ici ont moins de 800 volts aux bornes; si la différence de potentiel de la canalisation est très constante, on peut arriver à faire fonctionner trois de ces tubes en série sur un transformateur de 3200 volts, 2 kilowatts. Un tube à azote de même longueur prendrait plus de 3000 volts, soit quatre fois plus.

» Cette différence de potentiel est sensiblement indépendante du régime, ou plutôt diminue légèrement lorsque le courant augmente, ce qui est la caractéristique habituelle des décharges électriques de la nature de l'arc. C'est ainsi que lorsque le courant quintuple, passant de 0,2 à 1 ampère, la différence de potentiel tombe simplement de 950 volts à 800.

» La différence de potentiel aux bornes du tube n'est pas tout entière absorbée le long de la colonne lumineuse, et par suite ne concourt pas tout entière à la production de la lumière. Comme dans tous les tubes à vide, une chute importante se produit au passage du courant des électrodes dans le gaz. J'ai mesuré cette chute à l'aide d'électrodes auxiliaires reliées à un électromètre et l'ai trouvée, dans le cas du cuivre, égale à 150 volts par électrode. La chute de potentiel le long du tube est de son côté de l'ordre de 80 à 100 volts par mètre. Il en résulte que, de l'énergie dépensée, une partie est perdue aux électrodes, partie d'autant plus importante que le tube est plus court. C'est cette même considération, on le sait, qui a conduit Moore aux tubes très longs qui caractérisent ses installations : avec des longueurs de 5 m ou 6 m, le rendement des tubes à azote serait prohibitif. Nous verrons dans un instant que ce n'est pas le cas pour les tubes au néon.

» *Intensité.* — L'intensité de régime des tubes à néon de 45 mm, quelle que soit leur longueur, est de l'ordre de 1 ampère. Elle peut d'ailleurs varier à volonté entre 0,6 et 1,3 ampère, grâce à une variation convenable de la self-induction de réglage, et ceci sans que le rendement lumineux en soit sensiblement affecté. Cela confère aux tubes à néon une élasticité de fonctionnement fort intéressante, car cela permet de modérer l'éclairage en temps normal pour le pousser beaucoup dans les grandes occasions. Il est à noter toutefois que la lumière est d'autant plus rouge que le courant est moins intense.

» *Puissance lumineuse.* — Au régime de 1 ampère, un tube de 6 m, soit 5 m utiles, photométré par tranches de 20 cm, à l'aide d'une lampe Carcel dont la lumière rougeâtre facilite la comparaison, donne environ 900 bougies, soit un peu moins de 200 bougies par mètre, au lieu de 50 pour l'éclairage Moore.

» *Rendement.* — La puissance apparente correspondant à ces 900 bougies, soit 800 watts, est affectée d'un facteur de puissance de 0,80 environ, qui, comme dans le cas des tubes Moore, ne doit sans doute pas être attribué à un décalage de l'intensité sur le courant, mais à une déformation des courbes de courant. Si l'on tient compte de ce facteur de puissance, on voit que la puissance réelle dépensée est de $800 \text{ v} \times 1 \text{ amp} \times 0,80 = 640 \text{ watts}$, et que par suite le rendement de l'énergie dépensée dans le tube lui-même ressort à 0,72 w : b environ pour ce tube très court. Si l'on tient compte de la perte dans le transformateur et dans la self, on arrive au rendement global de 0,9 w : b. Ce résultat est très remarquable pour un tube aussi court. Aussi je pense que, dans beaucoup de cas où la question économique n'est pas primordiale, ces tubes courts pourront être employés avantageusement, car ils peuvent être fabriqués en usine avec toutes les facilités désirables, transportés tout finis au lieu d'utilisation et mis en place ou déplacés avec la même facilité que des lampes à arc.

» La différence entre le rendement global 0,9 w : b et le rendement dans le tube seul 0,75 montre en passant quel progrès considérable on réaliserait si les Secteurs voulaient bien placer chez les abonnés des transformateurs donnant 1000 à 1200 volts au secondaire et capables d'alimenter directement les tubes, ou mieux encore, s'ils permettraient de brancher directement les tubes sur la haute tension; sans compter qu'outre le rendement meilleur et la suppression de la perte dans les transformateurs actuellement supportée par les Secteurs, on supprimerait ainsi le plus gros élément de dépense de l'installation, et que l'éclairage au néon deviendrait ainsi extrêmement économique. Or, je pense qu'avec les précautions convenables, aucune objection sérieuse ne peut être élevée contre cette manière de faire.

» Si dans les résultats ci-dessus on fait abstraction des 300 volts

perdus aux électrodes, on arrive à $500 \text{ v} \times 1 \text{ amp} \times 0,80 = 400 \text{ w}$ effectivement dépensés dans la colonne lumineuse, soit $0,45 \text{ w} : b$. C'est évidemment vers cette limite que tendrait un tube très long alimenté directement en haute tension suivant le *desideratum* que je viens de formuler. J'ai effectivement trouvé $0,6 \text{ w} : b$, compris transformateur et self, pour un des tubes de 36 m de long que j'avais installés au Salon de l'Automobile de 1910 avec l'aide de la Société Moore. Et voici un tube de 13 m replié en un rectangle de $4 \text{ m} \times 2,50 \text{ m}$, qui appartient encore à la catégorie des tubes transportables (la preuve, c'est ce que nous l'avons transporté ici), qui possède le rendement global excellent de $0,7 \text{ watt}$. S'il était alimenté directement en haute tension, il consommerait moins de $0,6 \text{ watt}$. Somme toute, on peut tenir pour certain qu'avec les longs tubes, l'alimentation directe en haute tension, et avec les perfectionnements que suggérera l'avenir, couleur du verre, densité de courant, pression du néon, diamètre des tubes, etc., on tombera notablement au-dessous de $0,5 \text{ watt}$.

» Ces résultats sont évidemment très bons; peut-être ne répondent-ils pas encore à l'idée que vous avez pu vous en faire à la mesure de mon enthousiasme. C'est qu'on a annoncé, en particulier pour l'arc à flamme et les lampes quartz à mercure, des chiffres si extraordinairement bas, $0,15 \text{ watt}$ par bougie pour les premiers, $0,25$ pour les seconds, que mes modestes $0,5 \text{ watt}$ ne peuvent avoir la prétention de vous stupéfier. C'est assez souvent la récompense des affirmations sincères. Aussi me faut-il ajouter quelques commentaires qui donneront à ces chiffres leur véritable portée.

» Tout d'abord, les tubes au néon n'ont l'avantage ni de pouvoir être poussés au point de vue rendement, ni de présenter comme les lampes à arc une intensité maxima dans une direction privilégiée, qu'on ne manque naturellement pas de viser dans les mesures photométriques destinées à figurer dans les prospectus.

» Le rendement de mes tubes, lui, est pour ainsi dire indépendant du régime, et les chiffres que j'ai donnés sont donc ceux du fonctionnement normal, tandis que les rendements extraordinaires ci-dessus, je le répète, sont des chiffres sensationnels réalisés dans une direction favorisée, à l'aide d'un ensemble de conditions

privilégiées impossibles à remplir même de loin dans la pratique, charbons très fins, courants très intenses, fonctionnement impeccable, etc., et, pour les lampes quartz à mercure, régime de poussage absolument déterminé dont on ne peut s'écarter sous peine de voir s'effondrer le rendement. De plus, ces 0,15 à 0,25 watt représentent comme on sait des watts *hémisphériques*, tandis que les tubes au néon sont affectés d'une répartition beaucoup plus uniforme et que mes 0,5 watt sont presque des watts *sphériques*. Voilà, évidemment, qui est encore de nature à diminuer singulièrement l'écart.

» Mais ce n'est pas tout ! Car il ne faut pas oublier que les chiffres flamboyants rappelés ci-dessus sont, bien entendu, relatifs aux foyers nus, et que le globe dont il est indispensable d'entourer ces sources d'énorme éclat absorbe, quand il est propre, 20 à 40 pour 100 de la lumière émise ; ceci est tout à fait inutile pour les tubes au néon, surtout s'ils sont placés à une hauteur suffisante. En somme, toutes les personnes qui utilisent de telles sources ne me démentiront pas si j'évalue le rendement réel *pratique* des meilleures de ces sources à 0,3 watt hémisphérique pour les arcs à flamme, et à 0,4 watt à peu près aussi hémisphérique pour les arcs silica au mercure, de sorte que déjà, au seul point de vue de la consommation, il y a sensiblement *équivalence* entre les meilleures sources et les longs tubes au néon.

» Mais pour donner ces résultats, on sait toutes les infirmités dont sont dotées les sources actuelles : usure rapide de charbons très coûteux, entretien dispendieux et assommant, flottements de lumière, poussières et fumées désagréables, etc., et, pour les arcs au mercure, couleur déplorable de la lumière, très mal corrigée encore malgré tous les efforts. Et ces inconvénients sont si réels que le règne des lampes à arc paraît sur son déclin. Les 1,2 watt des lampes à filament métallique ont fait le plus grand tort aux 0,4 watt des lampes à arc, tout simplement parce qu'avec elles ces inconvénients n'existent pas. Or, rien de tout cela non plus avec les tubes au néon. Ces appareils partagent avec les lampes à incandescence le privilège capital d'un entretien nul, mais possèdent, en plus, celui d'une extrême économie. Ce fait leur

confère évidemment une supériorité énorme qui se traduira certainement par de nombreuses applications.

» Il est vrai qu'il reste à nous poser une question, et à nous demander si la lumière très économique mais si spéciale que nous venons d'étudier est ... pratiquement utilisable ! Au point de vue de la diffusion d'abord, il n'y a pas de doute, puisque nous obtenons directement ainsi la lumière diffuse avec tous ses avantages : l'éclairage sans ombres, sans fatigue pour les yeux.

» Mais il y a la couleur.

» Si vous vous en rapportiez à ce que beaucoup d'entre vous ont vu au Salon de 1910, vous vous attendiez à retrouver ici une lumière d'un rouge fantastique, donnant des couleurs l'idée la plus fausse, et voici que vous vous trouvez en présence d'une lumière à laquelle votre œil s'accoutume, j'en suis certain, avec la plus grande facilité, d'une lumière très chaude qui donne aux visages un aspect de santé aux antipodes de l'effet déplorable des lampes à mercure. Par un phénomène extrêmement curieux, ce n'est en aucune façon l'impression du rouge que vous ressentez, mais celle du jaune orangé, et j'ai dit en effet l'importance des radiations jaunes et vertes de cette lumière. C'est donc cette impression qui est correcte. Cependant, il n'y a pas à le nier, quand on contemple à distance un monument extérieurement illuminé avec des tubes au néon, de préférence dissimulés à la vue, il apparaît comme noyé dans des lueurs d'incendie d'un rouge fantastique. Cette impression provient évidemment de la comparaison involontaire avec les sources voisines, et en particulier avec les becs de gaz, qui apparaissent tout verts. Ce qu'il y a de sûr en tout cas, c'est qu'on obtient alors un effet superbe qui met merveilleusement en valeur les beautés architecturales du monument, et vraiment, pour cette application spéciale, l'éclairage au néon est sans rival. Grâce à l'obligeance du spécialiste bien connu de la photographie en couleurs, M. Gimpel, je puis vous rappeler ici le souvenir de l'installation du Grand Palais et, d'autre part, l'effet assez curieux de l'illumination avec 50 tubes de 6 m de l'une des plus belles églises de Rouen, l'église Saint-Ouen, pendant les fêtes récentes du Millénaire normand.

» Quelque intéressante que puisse paraître cette application, c'est cependant sous son deuxième aspect, sous l'aspect qu'elle affecte ici même à vos yeux, que la lumière au néon est de beaucoup la plus intéressante. Si en effet son avenir devait se limiter aux illuminations, à certains effets de réclame ou de théâtre, elle serait condamnée à une existence plutôt misérable. En réalité, vous vous en rendez compte, c'est une lumière parfaitement acceptable pour beaucoup d'emplois. Je n'irai pas, bien entendu, jusqu'à me féliciter de ce que le bleu en soit aussi totalement absent, mais en somme, et à part cette infirmité, on conserve assez bien en général la notion des couleurs, et avec un peu de bonne volonté l'aspect de ces murs par exemple ne doit pas vous donner une impression tellement différente de celle du blanc. Et puis, dans cet immense champ de l'éclairage, il y a tant de cas où la couleur est indifférente et où l'économie et l'absence d'entretien sont des facteurs autrement importants.

» D'ailleurs, dans tous les cas où un effet plus artistique est nécessaire, il ne sera pas difficile de corriger la lumière : il suffira d'adjoindre aux tubes quelques lampes à filament métallique poussées, donc très économiques, pour obtenir un éclairage rosé dont je puis vous donner ici une idée approchée et qu'on adoptera alors comme éclairage de luxe. On pourra, d'autre part, réaliser une correction presque parfaite à l'aide de tubes à vapeur de mercure et, par exemple, un très joli effet sera obtenu en plaçant, au centre d'un tube à néon en rectangle de $4\text{ m} \times 2,50\text{ m}$, un tube à vapeur de mercure de 600 à 800 bougies. Ce sera peut-être pour ces appareils l'occasion de se réhabiliter dans les bonnes grâces des dames....

» Enfin, permettez-moi de signaler encore à l'actif de la lumière au néon l'acuité visuelle tout à fait remarquable qui en est la conséquence. Vous pouvez voir par exemple avec quelle netteté extrême se détachent les caractères très fins des tables de formulaires. Ce sera dans beaucoup de cas une des particularités les plus précieuses de ce mode d'éclairage.

» En résumé, je suis fermement persuadé qu'en dehors des ressources tout à fait nouvelles que l'éclairage au néon pourra donner à l'art des illuminations et à celui de la réclame, il sera

susceptible d'applications très nombreuses dans les usines, garages d'automobiles, chantiers, salles d'attente de gares, salles de lectures, halls d'établissements financiers, et peut-être même pour l'éclairage public. Je suis même convaincu, je le répète, que ce ne sera pas simplement un éclairage utilitaire applicable seulement quand l'économie sera en jeu, mais que dans beaucoup de cas, surtout quand l'éducation du public se sera faite, il se fera une large place comme éclairage de luxe.

» En terminant, je dois dire que je ne pense pas, comme on me l'a insinué, que cet éclairage rende les gens fous ni même méchants. Je tiens de M. A. Lumière lui-même que l'histoire des gens de son usine rendus ingouvernables par la lumière rouge est une fable, une fable inventée pour les besoins de la lumière bleue. Pour avoir l'horreur du rouge, nous ne sommes pas encore des taureaux. L'avis de ces spécialistes éminents que sont MM. Broca et Sulzer est même que la lumière du néon est excellente au point de vue physiologique. Et la meilleure preuve, au reste, que cette insinuation est une légende, c'est vous-mêmes qui me la fournirez, par le calme vraiment exemplaire avec lequel vous avez subi, sous le feu du néon, la dure épreuve que je vous ai infligée. Permettez-moi de vous en remercier doublement, puisque vous me donnez ainsi à moi-même un peu plus de confiance encore dans le grand avenir de ce mode d'éclairage.

» J'ajoute, Messieurs, que c'est la Maison Paz et Silva qui s'est chargée de l'exploitation en France de ce nouveau mode d'éclairage. »

M. le PRÉSIDENT remercie M. Claude d'avoir bien voulu faire à la Société cette belle et intéressante présentation, et communiquer le résultat des recherches auxquelles son nom est attaché.

M. SWYNGEDAUF fait ensuite une Communication sur *la commutation dans les dynamos à courant continu*. Le texte en sera publié dans un prochain *Bulletin*.

La séance est levée à 10 h 15 m du soir.

LISTE DES OUVRAGES

OFFERTS A LA SOCIÉTÉ INTERNATIONALE DES ÉLECTRICIENS.

(Suite.)

La Bibliothèque est ouverte aux Membres de la Société, tous les jours,
de 3 heures à 6 heures, excepté les dimanches et jours de fêtes,
12, rue de Staël.

France.

- Applications industrielles de l'Électricité. Conférences faites à la section de Liège de l'Association des Ingénieurs sortis de l'Université de Liège, par L. CREPLET. 2^e édition, Liège, Imprimerie H. Vaillant-Carmanne, 1910; 1 vol. in-8, broché. (Don de l'Association des Ingénieurs sortis de l'Université de Liège.)*
- Courants (Les) alternatifs de haute fréquence. Théorie, production, applications, par A. CHARBONNEAU. Paris, L. Geisler, 1911; 1 vol. in-8, broché. (Don de l'éditeur.)*
- Cours municipal d'Électricité industrielle, par L. BARBILLION. 2^e édition, revue et augmentée avec la collaboration de P. BERGEON et M. CLARET. Tome II : Courants alternatifs, 2^e fascicule. Paris, L. Geisler, 1911; 1 vol. in-8, broché. (Don de l'éditeur.)*
- Dénivellations de la voie et oscillations des véhicules de chemins de fer. Compléments théoriques. Études diverses, par Georges MARIÉ. Paris, Dunod et Pinat, 1911; 1 vol. in-8, broché. (Don de l'éditeur.)*
- Échauffement (L') et la ventilation des machines électriques de grande puissance, par Carlo CAMINATI. Paris, Société générale d'imprimerie et d'édition Levé, 1911; 1 brochure in-8. (Don de l'auteur.)*
- Limites de flexibilité des ressorts et limites de vitesse du matériel des chemins de fer, par Georges MARIÉ. Paris, Dunod et Pinat, 1911; 1 vol. in-8, broché. (Don de l'éditeur.)*
- Nouvelle (La) industrie des Lampes électriques à filaments métalliques. Lampe Z. Aperçu général, par Charles MOURLOX. Paris, Librairie générale des Arts, des Sciences et des Lettres; Bruxelles, J. Lehègue et C^e, 1911; 1 vol. in-4, broché, avec planches hors texte. (Don de l'auteur.)*
- Principes de la Technique de l'Éclairage, par le Dr Ing. L. BLOCH. Traduit par G. ROY. (Bibliothèque de l'Élève-Ingénieur). Grenoble, Jules Rey;*

Paris, Gauthier-Villars, 1911; 1 vol. in-8, broché. (*Don de M. Gauthier-Villars.*)

Règle à calculs. Instruction, applications numériques. par A. BEGHN. 5^e édition, refondue et considérablement augmentée. Paris, Ch. Béranger, 1912; 1 vol. in-8, broché. (*Don de l'éditeur.*)

Savants du jour. Gabriel Lippmann, Biographie, Bibliographie analytique des écrits, par Ernest LEBON. Paris, Gauthier-Villars, 1911; 1 vol. grand in-8, broché. (*Don de l'éditeur*)

Traction électrique par courant alternatif monophasé transformé sur la locomotive en courant continu. Essais effectués sur la ligne de Cannes à Grasse, par M. AUVERT. Paris, Dunod et Pinat, 1911; 1 brochure in-folio. (*Don de M. Chabal.*)

Traité de Physique, par O.-D. CHWOLSON. Ouvrage traduit sur les éditions russe et allemande par E. DAVAUX. Tome III, 3^e fascicule : *Propriétés des vapeurs. Équilibre des substances en contact.* Paris, A. Hermann et fils, 1911; 1 fascicule in-8, broché. (*Don de l'éditeur.*)



BULLETIN
DE LA
SOCIÉTÉ INTERNATIONALE
DES
ÉLECTRICIENS.

SOMMAIRE.

Don au Laboratoire, p. 528. — Membres décédés, p. 528. — Étude expérimentale sur la résistance des rails d'acier, en courant alternatif (M. Villiers), p. 529; observations (M. Boucherot), p. 538. — Sur la compréhension de l'effet de peau (M. Girault), p. 543. — Compte rendu de l'étude relative aux phénomènes électromagnétiques dus à la mise en court circuit des machines (M. Brunswick), p. 555.

BIBLIOGRAPHIE, p. 596.

OUVRAGES OFFERTS, p. 598.

COMPTE RENDU

DE LA

RÉUNION ORDINAIRE MENSUELLE

du mercredi 6 décembre 1911 ⁽¹⁾.

PRÉSIDENCE DE M. G. LIPPMANN.

La séance est ouverte à 8 h 40 m du soir.

Le procès-verbal de la dernière réunion mensuelle est adopté.

Il est donné connaissance des Ouvrages offerts pour la biblio-

(¹) La Société n'est pas solidaire des opinions émises par ses Membres dans les discussions, ni responsable des Notes ou Mémoires publiés dans le *Bulletin*.

thèque (*voir* p. 598) et d'un don pour le Laboratoire communal d'électricité.

M. le PRÉSIDENT fait part du décès de MM. *Mix* et *baron G. de Rothschild*; il en exprime les regrets de la Société.

Des remerciements sont adressés à M. *Fabius Henrion* pour le don de 12 lampes Osmine.

L'ordre du jour appelle les Communications techniques.

**ÉTUDE EXPÉRIMENTALE SUR LA RÉSISTANCE DES RAILS D'ACIER,
EN COURANT ALTERNATIF.**

(Travail exécuté au Laboratoire central d'Électricité.)

M. C. VILLIERS. — « Messieurs, le grand développement pris, dans ces dernières années, par la traction monophasée, a attiré de nouveau l'attention sur la question de l'augmentation de résistance des conducteurs magnétiques de grande section, parcourus par du courant alternatif.

» Depuis les travaux classiques de Lord Kelvin, de nombreux théoriciens ont abordé le sujet. Nous nous bornerons à citer le travail que M. Boucherot a présenté à la Société, en 1908 ⁽¹⁾.

» M. Boucherot considère le courant comme uniformément réparti dans une coque d'épaisseur ϵ , et il donne une formule permettant le calcul de ϵ .

» Mais, dans toutes les formules données par ces divers auteurs, intervient la perméabilité du fer, et, cette grandeur étant excessivement variable, une grande indécision subsiste.

» Les expériences sur la variation de résistance d'un rail, en courant alternatif, sont peu nombreuses.

» Nous signalerons celles d'Herzog et Feldmann ⁽²⁾ qui, à côté des mesures faites sur des éprouvettes de forme simple, ont également envisagé le cas des rails. Leurs études ont porté sur de véritables voies artificielles, mais, la présence de nombreuses éclisses modifiait beaucoup le phénomène.

» Ils arrivèrent à la conclusion que la résistance d'une semblable voie, en courant alternatif de fréquence 50, était de 4 à 5 fois plus grande qu'en courant continu.

» Ils citent également quelques expériences faites au laboratoire de la maison Hélios, sur des rails simples, dont la résistance aurait été, pour un courant de fréquence 50, 9 fois la résistance en courant

⁽¹⁾ *Bulletin de la Société Internationale des Électriciens*, novembre 1908.

⁽²⁾ *Elekt. Zeit.*, 1900, p. 844.

continu. (Ceci correspondrait, d'après la formule de J.-J. Thomson, à un coefficient de perméabilité de 1000.)

» Mais les auteurs ne donnent aucune indication sur l'intensité du courant de mesure, dont pourtant dépend énormément la perméabilité et, par suite, le résultat cherché.

» Signalons également un travail plutôt théorique de Wilson ⁽¹⁾; les résultats de ses expériences, faites à la fréquence 11, semblent diverger beaucoup de ceux prévus par le calcul.

» Les expériences, citées par Herzog et Feldmann, furent réalisées en usine, et dans des conditions telles que les mesures faites ne semblent pas présenter tout le caractère de précision désirable.

» C'est pourquoi, à l'instigation du reste de plusieurs industriels, j'ai entrepris d'étudier expérimentalement le phénomène avec toute la précision que comportaient les moyens dont je disposais au Laboratoire Central d'Électricité.

» J'ai été, dans cette recherche, guidé et aidé par M. Jouaust, auquel je suis heureux de pouvoir exprimer ici ma profonde reconnaissance.

» J'ai cherché à mettre en évidence les variations que présente cette augmentation de résistance, lorsqu'on fait varier, entre les limites usuelles, les deux grandeurs dont elle dépend (intensité et fréquence du courant).

» *Description des expériences.* — Le rail qui nous a servi avait été obligeamment mis à notre disposition par les ingénieurs du Nord-Sud.

» C'était un rail à double champignon, de 50 kg par mètre, ayant une section de 65 cm². La longueur du coupon utilisé était de 2,91 m.

» La méthode de mesure employée était celle connue sous le nom de *méthode d'Anderson*, pour la mesure des coefficients de self-induction. Nous nous proposons, en effet, d'étudier non seulement la variation de la résistance du rail, mais aussi la variation de son coefficient de self-induction.

» Le circuit, constitué par le trolley et le rail de retour, présente une certaine self; en négligeant l'influence des conducteurs qui

⁽¹⁾ *Proceeding.*

ferment ce circuit, cette self peut s'écrire

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_1 + \mathcal{L}_2 - 2M;$$

$\mathcal{L}_1$ représente le coefficient de self-induction du trolley, supposé seul dans l'espace;

$\mathcal{L}_2$ le coefficient de self du rail;

M le coefficient d'induction mutuelle des deux conducteurs rectilignes.

» En assimilant le trolley et le rail de retour à deux conducteurs cylindriques de longueur l et de rayon ρ , on aurait

$$\mathcal{L}_1 = \mathcal{L}_2 = 2l \left(\log_e \frac{2l}{\rho} - 1 + \frac{\mu}{4} \right),$$

et en appelant d la distance de deux conducteurs

$$M = 2l \left(\log_e \frac{2l}{d} - 1 + \frac{d}{l} \right),$$

formule approximative.

» L'expression de $\mathcal{L}_1$ et $\mathcal{L}_2$ tient compte : 1° des lignes de force circulant dans l'air; 2° de celles qui circulent dans le conducteur.

» C'est à ces dernières que correspond le terme $\frac{\mu}{4}$.

» Si, par suite de l'effet pelliculaire, le courant est rejeté à la surface, il en sera de même des lignes de force intérieures au conducteur qui verra ainsi son coefficient de self diminuer.

» En particulier, si la répartition était purement superficielle, on aurait

$$\mathcal{L}_1 = 2l \left(\log_e \frac{2l}{\rho} - 1 \right).$$

» D'une façon générale, si le rail, supposé cylindrique, est parcouru par un courant alternatif, de pulsation ω , en appelant C la conductivité du métal, μ sa perméabilité, ρ son rayon, on a

$$\mathcal{L}_0 - \mathcal{L}_\omega = \frac{2\mu}{m\rho} \frac{\text{ber}'(m\rho) \text{ber}'(m\rho) + \text{bei}(m\rho) \text{bei}'(m\rho)}{\text{ber}'^2(m\rho) + \text{bei}'^2(m\rho)} - \frac{\mu}{2}.$$

» Dans cette formule, $\mathcal{L}_0$ représente la self intérieure du conducteur en courant continu (c'est-à-dire le flux intérieur au conducteur émis par le courant 1); $\mathcal{L}_\omega$, la self du même conducteur en

courant alternatif de pulsation ω

$$m = \sqrt{4\pi\mu C\omega}.$$

» Il était donc intéressant de se rendre compte de l'ordre de grandeur des variations du coefficient de self ⁽¹⁾.

(¹) En appelant R_0 la résistance du conducteur en courant continu, R_ω et $\mathcal{L}_\omega\omega$ sa résistance et sa réactance intérieure en courant alternatif, on a

$$\begin{aligned}\frac{R_\omega}{R_0} &= \frac{m\rho}{2} \frac{\text{ber}(m\rho)\text{bei}'(m\rho) - \text{bei}(m\rho)\text{ber}'(m\rho)}{\text{ber}'^2(m\rho) + \text{bei}''^2(m\rho)}, \\ \frac{\mathcal{L}_\omega\omega}{R_0} &= \frac{m\rho}{2} \frac{\text{ber}(m\rho)\text{ber}'(m\rho) + \text{bei}(m\rho)\text{bei}'(m\rho)}{\text{ber}'^2(m\rho) + \text{bei}''^2(m\rho)}; \\ \text{d'où} \quad \frac{\mathcal{L}_\omega\omega}{R_\omega} &= m\rho \frac{\text{ber}(m\rho)\text{ber}'(m\rho) + \text{bei}(m\rho)\text{bei}'(m\rho)}{\text{ber}(m\rho)\text{bei}'(m\rho) - \text{bei}(m\rho)\text{ber}'(m\rho)}.\end{aligned}$$

Cherchons ce que devient ce rapport, pour les grandes valeurs de ω .

Pour x très grand on a :

$$\begin{aligned}\lim \text{ber}.x &= \frac{1}{\sqrt{2\pi x}} e^{\frac{x}{\sqrt{2}}} \cos\left(\frac{x}{\sqrt{2}} - \frac{\pi}{8}\right), \\ \lim \text{bei}.x &= \frac{1}{\sqrt{2\pi x}} e^{\frac{x}{\sqrt{2}}} \sin\left(\frac{x}{\sqrt{2}} - \frac{\pi}{8}\right).\end{aligned}$$

Posons

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi x}} e^{\frac{x}{\sqrt{2}}} = F(x),$$

nous aurons

$$\begin{aligned}\text{ber}'x &= F' \cos\left(\frac{x}{\sqrt{2}} - \frac{\pi}{8}\right) - \frac{F}{\sqrt{2}} \sin\left(\frac{x}{\sqrt{2}} - \frac{\pi}{8}\right), \\ \text{bei}'(x) &= F' \sin\left(\frac{x}{\sqrt{2}} - \frac{\pi}{8}\right) + \frac{F}{\sqrt{2}} \cos\left(\frac{x}{\sqrt{2}} - \frac{\pi}{8}\right);\end{aligned}$$

done

$$\begin{aligned}\text{ber}.x\text{ber}'x + \text{bei}.x\text{bei}'x &= FF', \\ \text{ber}.x\text{bei}'x - \text{bei}.x\text{ber}'x &= \frac{F^2}{\sqrt{2}}\end{aligned}$$

et

$$\frac{\mathcal{L}_\omega\omega}{R_\omega} = \frac{F'\sqrt{2}}{F}.$$

Or,

$$\begin{aligned}F'(x) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \left[\frac{1}{\sqrt{2}} e^{\frac{x}{\sqrt{2}}} x^{-\frac{1}{2}} - \frac{1}{2} x^{-\frac{3}{2}} e^{\frac{x}{\sqrt{2}}} \right] \\ &= F(x) \left[\frac{1}{\sqrt{2}} - \frac{1}{2x} \right];\end{aligned}$$

done

$$\frac{\mathcal{L}_\omega\omega}{R_\omega} = \left[\frac{1}{\sqrt{2}} - \frac{1}{2x} \right] \sqrt{2},$$

expression qui tend vers 1 pour x infini.

Pour les très grandes fréquences, la réactance intérieure d'un conducteur cylindrique massif devient égal à sa résistance.

R. JOUAUST.

» Nous avons monté un pont d'Anderson, constitué par le rail étudié, une résistance étalon de 0^m,0001 (étalon Carpentier, formé

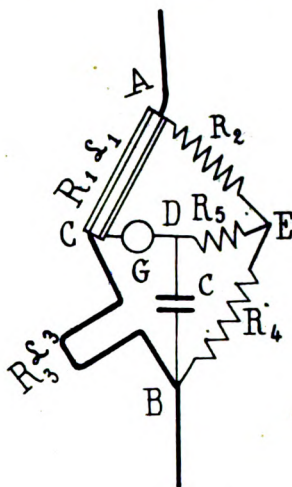


Fig. 1.

d'un conducteur en cuivre lamellé, de self très faible, baigné dans du pétrole); de boîtes de résistance de self négligeable et d'une capacité étalon, de pertes négligeables.

» Rappelons en quelques mots la méthode d'Anderson.

» Si l'on règle les diverses résistances, de façon qu'en appliquant entre A et B une différence de potentiel continue, le galvanomètre G reste au zéro, nous avons

$$\frac{R_1}{R_3} = \frac{R_2}{R_4}.$$

» Appliquons maintenant une différence de potentiel alternative; les constantes de temps des différents bras n'étant pas égales, un courant alternatif traversera le galvanoscope.

» Si la résistance R_1 avait la même valeur en courant continu qu'en courant alternatif, il suffirait, après avoir réglé le pont en courant continu, d'agir sur le bras dérivé R_3C pour avoir l'équilibre en courant alternatif.

» En appliquant les lemmes de Kirchhoff aux différents circuits, on trouve les deux relations

$$(\alpha) \quad \left\{ \begin{array}{l} (1) \quad \frac{R_1}{R_3} = \frac{R_2}{R_4}, \\ (2) \quad L_1 = CR_3 \left(R_2 + R_5 \frac{R_2 + R_4}{R_4} \right). \end{array} \right.$$

» La formule (2) nous donnerait ainsi la valeur de la self-induction du bras AC.

» Mais, si la résistance R_1 a une nouvelle valeur en courant alternatif, il faudra agir à la fois sur R_1 ou C et sur les autres bras du pont.

» On arrive très facilement à faire consécutivement les deux réglages nécessaires et l'équation (1) donne la valeur de la résistance du rail en courant alternatif.

» *Galvanomètre.* — L'appareil de zéro employé était un galvanomètre de résonance, du type de Campbell, entièrement construit par M. Testavin, préparateur au Laboratoire central, auquel je suis heureux d'adresser tous mes remerciements.

» La fréquence d'oscillation pouvait être réglée de 15 à 60, en agissant soit sur la longueur du bifilaire, soit sur sa tension. Le champ directeur était produit par un électro feuilleté parcouru par un courant continu d'une vingtaine d'ampères.

» La sensibilité de l'appareil est telle qu'un courant de 1 micro-ampère donne une bande lumineuse de 25 cm sur une règle placée à 1 m du miroir.

» Cet appareil, ne résonnant que pour une fréquence donnée, permet de n'avoir à considérer que l'harmonique fondamental.

» De fait, à l'inverse de ce qui se passe pour les mesures en courant alternatif utilisant le téléphone comme appareil de zéro, nous arrivions à un équilibre parfait du cadre oscillant.

» *Causes d'erreur.* — La quantité L_1 donnée par l'équation (2), ne correspond pas du tout à ce que nous avons appelé, dans les formules données plus haut, la *self du rail* $\mathcal{L}_1$. On ne peut, en effet, faire abstraction des autres conducteurs, et l'expérience nous a bien montré que l'influence de leur position était très importante.

» Les deux équations α ne sont exactes que :

» 1° Si la résistance étalon n'a pas de self;

» 2° Si les circuits n'ont pas de mutuelle les uns sur les autres.

» Supposons que la résistance étalon ait une self $\mathcal{L}_1$, et que les conducteurs parcourus par le courant principal produisent une f. e. m. d'induction $M \frac{di}{dt}$ entre les deux points C et D (nous pouvons

négliger les effets d'induction produits par les branches AEB et EDB, car leur self est infiniment petite, et, de plus, elles sont parcourues par des courants très petits par rapport au courant principal).

» Dans ce cas, les formules précédentes deviennent :

$$(\beta) \quad \left\{ \begin{array}{l} (1) \quad R_1 = \frac{R_2 R_3}{R_4} - \omega^2 C (\mathcal{L}_3 + M) \left(R_2 + R_3 \frac{R_2 + R_4}{R_4} \right), \\ (2) \quad \mathcal{L}_1 = (\mathcal{L}_3 + M) \frac{R_2}{R_4} + M + C R_3 \left(R_2 + R_3 \frac{R_2 + R_4}{R_4} \right). \end{array} \right.$$

» Donc, l'équilibre ayant été obtenu en courant continu, pour l'avoir encore en courant alternatif, il faudra agir, non seulement sur R_3 et C , mais encore sur les autres bras du pont, même si la résistance R_1 n'a pas varié.

» La self $\mathcal{L}_1$ et la mutuelle M auront pour effet d'obliger à un nouveau réglage pour chaque fréquence.

» *Détermination de $\mathcal{L}_3$ et M .* — Il nous faut donc connaître $\mathcal{L}_3 + M$ pour le calcul de R_1 .

» Pour cela, nous avons remplacé le rail en fer par un câble en cuivre toronné, en conservant le plus possible la même forme au réseau.

» Nous nous sommes assuré que l'effet Kelvin dans ce câble était négligeable, de la façon suivante : Connaissant sa résistance r_1 en courant continu, de l'équilibre en courant alternatif, nous avons tiré, au moyen de l'équation $\beta(1)$ une valeur de $\mathcal{L}_3 + M$.

» En opérant à différentes fréquences, les conditions d'équilibre changeaient, mais nous avons constaté que les quantités qu'on en déduisait pour $\mathcal{L}_3 + M$, restaient les mêmes, quelle que soit la fréquence, en faisant l'hypothèse que la résistance ohmique était indépendante de la fréquence. Nous en avons conclu que l'effet Kelvin était négligeable pour ce câble, et que nous pouvions tirer $\mathcal{L}_3 + M$ de ces expériences.

» Nous n'avons pas pu séparer les valeurs de $\mathcal{L}_3$ et de M , car, pour cela, il nous aurait fallu pouvoir mesurer le coefficient de self du câble pour la fréquence zéro.

» Nous ne pourrions donc pas avoir les valeurs absolues de la

self du rail, mais seulement ses variations avec l'intensité et la fréquence du courant.

» Nous avons peut-être insisté un peu longuement sur la correction due à $\mathcal{L}_3 + M$, mais, en la négligeant, on s'exposerait à faire des erreurs sur la valeur de R_1 , de l'ordre de 20 à 25 pour 100 ⁽¹⁾.

» *Résultats expérimentaux.* — On peut voir, d'après les courbes tracées, que la résistance ohmique, qui était de 84 microhms en

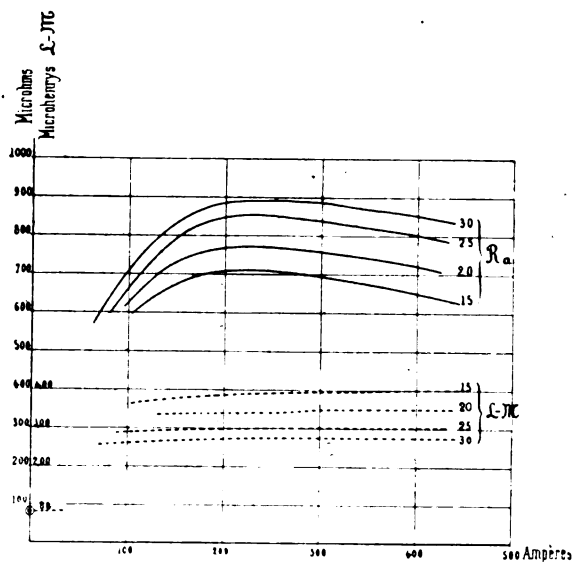


Fig. 5.

courant continu, prend des valeurs notablement plus grandes en courant alternatif.

» La valeur du courant a une grande importance, ce qui s'explique facilement par la variation de perméabilité.

» De l'augmentation de résistance apparente, nous pouvons

(1) La méthode d'Anderson, ainsi appliquée, pourrait d'ailleurs donner un procédé très commode et très précis, pour mesurer les puissances, réelles et virtuelles, mises en jeu dans un appareil quelconque à courant alternatif.

Connaissant sa résistance apparente R_a , et sa self apparente $\mathcal{L}_a$, nous pourrions calculer sa puissance réelle $R_a I^2$ et sa puissance virtuelle $\mathcal{L}_a \omega I^2$. Il suffit donc de pouvoir mesurer exactement le courant le traversant.

Nous avons appliqué cette méthode avec succès, pour mesurer les pertes dans un petit tore en fer, et il y aurait peut-être là une méthode d'étalonnage de wattmètre à courant alternatif, chose difficile et délicate avec les procédés actuels.

déduire l'épaisseur de la coque fictive, dans laquelle serait rejeté tout le courant, supposé uniforme.

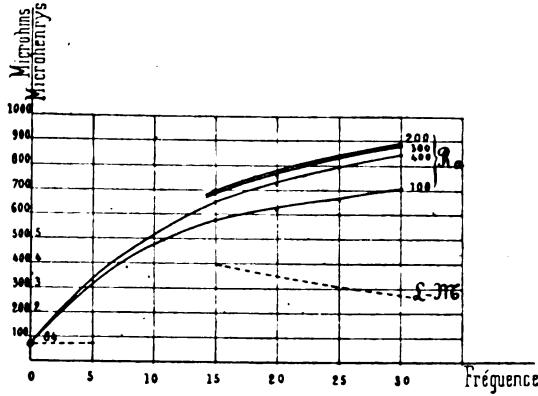


Fig. 3.

» Faisons le calcul, pour des courants de 400 et de 100 ampères et pour les fréquences 15 et 30.

» Soient :

R_0 la résistance en courant continu;

R_ω la résistance en courant alternatif de fréquence f ;

S , section du rail = 65 cm²;

p , périmètre de la section = 49,7 cm;

ε , épaisseur de la coque;

σ , section offerte au courant alternatif, supposé uniforme,

nous aurons

$$\sigma = S \frac{R_0}{R_\omega}$$

et

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{p}.$$

» De la formule donnée par M. Boucherot

$$\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{2\pi\mu c \omega}},$$

nous tirons

$$\mu = \frac{1}{\varepsilon^2 2\pi c \omega}.$$

» Connaissant la résistance $R_0 = 84$ microhms du rail, nous pou-

vons calculer la conductivité de l'acier :

$$c = \frac{291}{84 \times 65 \times 10^{-6} \times 10^9} = 0.533 \cdot 10^{-4} \text{ C. G. S.}$$

» Nous pouvons ainsi calculer le coefficient μ correspondant à chaque cas :

<i>I.</i> (Ampères.)	<i>f.</i> (Périodes.)	<i>ε.</i> (Centimètres.)	<i>μ.</i>
400	15	0,17	1090
»	30	0,13	935
100	15	0,189	884
»	30	0,156	650

» En introduisant ces valeurs de la perméabilité dans les formules telles que celle de M. Boucherot, on arrivera certainement à obtenir des résultats suffisants pour les besoins de la pratique industrielle; une simple expérience faite sur un bout de rail permettra à l'ingénieur de traction de se rendre compte des pertes de charge qui se produiront dans la voie qu'il va établir.

» Je terminerai en adressant à M. Janet tous mes remerciements pour l'accueil bienveillant que j'ai reçu de lui au Laboratoire Central, où j'ai pu, comme titulaire de la Bourse Hughes, faire cette étude. »

M. BOUCHEROT. — « Messieurs, j'ai fait, il y a une quinzaine d'années, quelques mesures industrielles de la résistance de rails pour les courants alternatifs que je n'ai pas eu l'occasion de faire connaître jusqu'ici. Lorsque je vous ai fait, en 1908, la communication que M. Villiers a bien voulu rappeler, j'avais égaré les papiers contenant les résultats; je les ai retrouvés il y a quelques mois. Je pense qu'il n'est pas sans intérêt de joindre ces résultats à ceux qui viennent de nous être exposés, les rails expérimentés étant d'un poids linéaire différent.

» Je vous demanderai la permission de rappeler d'abord les circonstances qui m'ont amené à faire ces expériences; elles ont quelque intérêt de curiosité!

» A cette époque on commençait à installer des tramways électriques dans Paris; entre l'économique trolley dont la Municipalité ne voulait pas et le trop coûteux caniveau, les systèmes

à contacts superficiels semblaient devoir emporter la préférence, malgré les craintes qu'ils inspiraient : vous savez ce qu'il en est advenu.

» J'avais songé à ce moment à l'utilisation des rails comme conducteurs et d'aller et de retour sous une tension alternative efficace très faible : 10 à 15 volts. De mesures de résistivité que j'avais faites sur des terres et bétons plus ou moins humides, sur la boue, la neige salée, etc., il résultait que la déperdition de puissance aurait pu être limitée, même par les temps les plus mauvais, à des valeurs très raisonnables, de l'ordre de grandeur des pertes en ligne, moyennant quelques précautions élémentaires et peu coûteuses. Il y avait bien quelques difficultés à prévoir, comme celle de capter sur les rails 1000 à 1500 ampères aux démarrages, comme l'isolement des roues, l'éclissage, etc., mais je m'étais rendu compte par quelques expériences que tout cela était facilement surmontable. Au point de vue financier comme au point de vue technique, le projet tenait debout à peu près : avec des transformateurs de quelques kilovolts-ampères espacés de 50 m en palier et de 30 m dans les fortes rampes, on pouvait assurer des chutes de tension et pertes raisonnables pour un prix d'installation peu supérieur à celui du trolley et très justifié par le grand trafic prévu.

» La Compagnie des Omnibus, dont notre collègue M. Monmerqué était alors ingénieur en chef, était toute disposée à faire un essai du système sur sa ligne de Saint-Ouen-Bastille, mais nous nous rendîmes compte que l'extrême sensibilité des chevaux était un véritable obstacle à l'application (1).

(1) Un homme peut prendre sans *aucune* sensation 20 volts efficaces dans les mains sèches et 5 volts dans les mains mouillées avec de l'eau salée. Entre les mains mouillées, une tension de 10 volts produit une sensation qui n'est aucunement désagréable, même pendant longtemps, et l'on supporte facilement jusqu'à 20 volts sans douleur. Il semble en être tout autrement des chevaux. La Compagnie des Omnibus mit à ma disposition 8 chevaux de diverses provenances et sexes : entiers, juments, hongres ; tous se comportèrent de même. On établissait une différence de potentiel croissante entre pattes de devant et pattes de derrière en amenant l'animal sur deux plaques reliées au secondaire d'un transformateur :

Avec 4 volts (efficaces), l'animal manifeste déjà de l'inquiétude et de l'agacement, il veut s'en aller ;

Avec 10 volts, il est affolé, souffle violemment par les naseaux ;

» J'avais donc été amené à faire des mesures sur l'augmentation de résistance des rails par les courants alternatifs. Ces mesures ont été faites avec des appareils *industriels*; elles n'ont donc pas une grande prétention à l'exactitude et cependant vous pourrez constater que les résultats en sont assez concordants.

» Chaque expérience était disposée suivant (*fig. 1*). Deux rails R de même longueur (2,50 m) et de sections identiques étaient posés

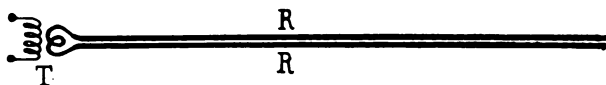


Fig. 1.

côte à côte de manière que le flux dans l'air soit sensiblement nul; ils étaient connectés ensemble à une extrémité et reliés à l'autre au secondaire d'un petit transformateur T comportant deux spires, le primaire en ayant 156. Les mesures étaient faites sur le primaire au moyen d'un voltmètre, un ampèremètre et un wattmètre. La tension primaire variait de 20 à 110 volts et la fréquence passait de 8 à 40 périodes par seconde. Le transformateur avait été préalablement étudié au point de vue de ses pertes en puissance réelle et puissance réactive dans le fer et dans les enroulements.

» Deux sortes de rails ont été étudiés : le rail Vignole de 32 kg par mètre et un autre de 10 kg par mètre. Les résultats sont portés dans les figures 2 et 3, dans lesquelles les points obtenus sont simplement reliés par des droites pour une même fréquence; en abscisses est l'intensité efficace dans le rail; en ordonnées sa résistance pour le calcul de l'effet Joule, ramenée au kilomètre de longueur. La réactance est sensiblement égale à la résistance, étant donnée l'importance de l'effet Kelvin.

» Le contour du rail de 32 kg par mètre était d'environ 50 cm (un peu moins); celui du rail de 10 kg par mètre, 30 cm, en arrondissant.

» Malheureusement, je n'ai pas mesuré la résistivité, puisque je me proposais seulement d'avoir la résistance pour courant alternatif.

Avec 15 volts, si on le maintient de force sur les plaques, les contractions musculaires sont telles que le ventre s'abaisse de 30 cm à 40 cm.

En présence de ces résultats, il n'y avait pas à songer à aller plus loin.

» Si l'on veut déduire l'épaisseur ε de la coque fictive, il faut faire une hypothèse sur la valeur de la résistivité ρ . Pour les aciers de cette nature, elle est certainement plus voisine de 20 que de 10 microhms-cm, résistivité du fer; M. Villiers a trouvé plus de

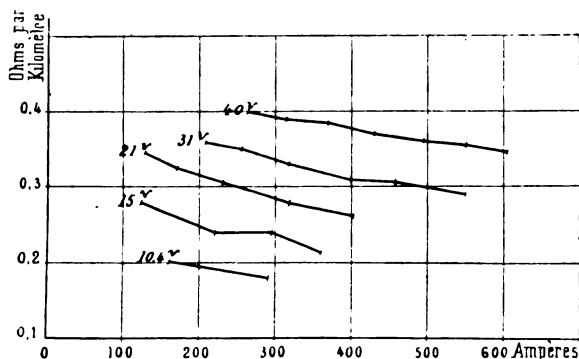


Fig. 2. — Résistance linéaire d'un rail de 32 kg par mètre.

18 pour son rail et M. Le Chatelier a donné ⁽¹⁾ des valeurs qui croissent avec la teneur en carbone depuis 10 pour 0,06 pour 100 de carbone, jusqu'à 19 pour 1,61 pour 100 de carbone.

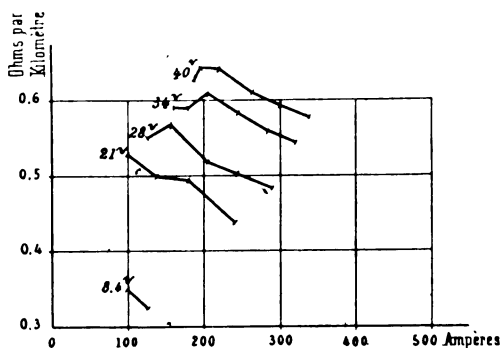


Fig. 3. — Résistance linéaire d'un rail de 10 kg par mètre.

» Pour voir dans quelle mesure le calcul de la résistance par l'épaisseur ε de la coque peut être suffisant en pratique, j'ai supposé à la résistivité la valeur 20 microhms-cm ($\frac{1}{5} \cdot 10^{-4}$ pour la conductivité en G. G. S.) et j'ai porté en figure 4 les valeurs de la perméabilité μ déduite de ces expériences, en fonction de la force magnétisante

(¹) *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, 13 juin 1898.

maxima. C'est bien, en effet, avec cette grandeur qu^e varie la perméabilité : quand il y a, par exemple, 400 ampères efficaces dans le rail de 32 kg par mètre, cela fait 565 ampères maximum et, comme le contour du rail est de 50 cm, 11,3 ampères-tours maximum déterminent le flux maximum, lequel est aussi localisé à la surface dans une épaisseur de l'ordre du millimètre.

» Dans cette figure sont portés ensemble tous les points obtenus avec toutes les fréquences et pour les deux rails.

» Si l'on veut bien tenir compte de ce que la méthode employée

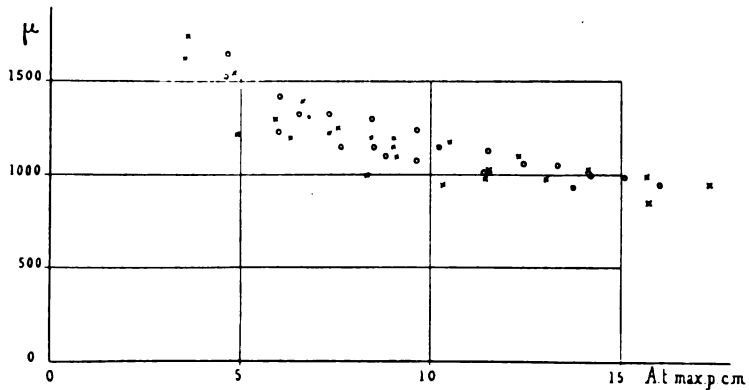


Fig. 4. — μ Perméabilité déduite de la résistance dans l'hypothèse $\rho = 20 \text{ microhms-cm} \times \text{Rail de } 32 \text{ kg par mètre}$; $\circ$ Rail de 10 kg par mètre.

est assez indirecte et les appareils de mesure industriels; de ce que dans la formule qui permet de calculer la perméabilité, celle-ci est proportionnelle au carré de la résistance mesurée, on peut en conclure, je crois, que l'artifice de calcul par l'épaisseur ϵ de la coque mérite toute confiance.

» La difficulté sera toujours de savoir exactement quelle perméabilité adopter dans un calcul de résistance : la valeur 1000 semble la plus fréquente pour des aciers et des gros courants. Et fort heureusement, la résistance étant proportionnelle à la racine carrée de la perméabilité, l'erreur sur celle-ci est réduite de moitié sur la résistance. »

M. le PRÉSIDENT remercie M. Villiers qui, titulaire de la Bourse Hughes, a effectué au Laboratoire les recherches dont il vient d'exposer les intéressants résultats, et M. Boucherot, pour les informations qu'il a bien voulu y ajouter.

SUR LA COMPRÉHENSION DE L'EFFET DE PEAU.

M. PAUL GIRAULT. — « Un conducteur cylindrique homogène étant soumis à une différence de potentiel alternative, la densité de courant efficace en régime établi, distribuée en cercles concentriques d'égale densité, va en décroissant d'une façon continue de la périphérie du conducteur au centre. Cet effet est d'autant plus accentué que le diamètre du conducteur est plus grand, que sa perméabilité et sa conductibilité sont plus élevées et que la fréquence de la différence de potentiel d'alimentation est plus haute.

» Considérons un tel conducteur présentant cet effet d'une façon accentuée; si l'on trace une courbe de la densité de courant instantanée, en fonction de la distance à la périphérie, on trouve une sinusoïde amortie dont les maxima et les minima se groupent sur deux courbes ressemblant à des exponentielles, symétriques par rapport à l'axe des distances, les ordonnées de ces deux quasi-exponentielles représentant les amplitudes maxima des densités de courant. En chaque point, la densité de courant est sinusoïdale en fonction du temps; cette densité est en retard de phase par rapport aux densités des portions du conducteur plus proches de la périphérie et en avance de phase par rapport aux densités des portions plus proches du centre. En prenant comme origine des phases celle de la densité de courant périphérique, on trouve que la phase de la densité de courant retarde de plus en plus au fur et à mesure qu'on se rapproche du centre du conducteur; ce retard de phase peut croître indéfiniment avec le rayon du conducteur.

» On a peine à comprendre *a priori* pourquoi ce retard de phase peut être supérieur à $\frac{\pi}{2}$, on est en effet tenté d'expliquer le décalage de phase par la différence de self que présentent les divers tubes concentriques d'épaisseur radiale infiniment petite qui composent le conducteur, chacun de ces tubes embrassant des flux intérieurs du conducteur qui ne sont pas embrassés par les tubes qui sont

extérieurs au tube considéré; or le courant dans une self ne peut être décalé de plus de $\frac{\pi}{2}$ en arrière de la différence de potentiel qui lui donne naissance.

» Il est cependant facile de comprendre le processus du phénomène par une analyse plus détaillée.

» La distribution du courant dans un conducteur cylindrique peut être représentée (fig. 1) par une série de tubes de courant

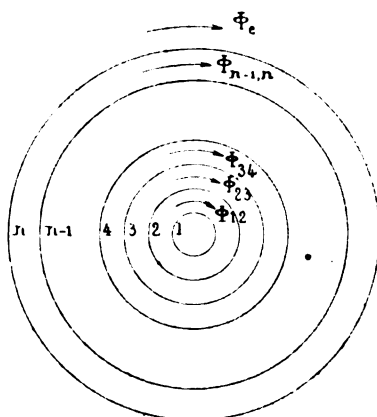


Fig. 1.

dont l'épaisseur radiale est infiniment mince devant la distance de deux tubes consécutifs; les intervalles entre deux tubes sont supposés sans courant et uniquement affectés au développement des flux magnétiques.

» On voit aisément dans cette représentation possible qu'on n'a aucun flux à l'intérieur du premier tube de courant; entre le premier tube de courant d'intensité i_1 et le second d'intensité i_2 existe un flux Φ_{12} qui est embrassé uniquement par le circuit du premier tube de courant et est en phase avec le courant i_1 dans ce premier tube.

» La variation de ce flux Φ_{12} ne peut donc induire de f. e. m. que dans le circuit du tube 1. De même entre le tube 2 et le tube 3 existe un flux Φ_{23} qui est en phase avec la somme $i_1 + i_2$ des intensités des tubes 1 et 2 et dont la variation ne peut induire de f. e. m. que dans les circuits des tubes 1 et 2, etc.

» Si donc l'on considère une certaine longueur du conducteur cylindrique limitée par deux surfaces planes équipotentielles nor-

males à l'axe du conducteur, et par conséquent parallèles entre elles, et si nous désignons par :

u , la différence de potentiel entre ces deux surfaces, égales pour tous les tronçons de tubes y aboutissant;

$r_1, r_2, r_3, \dots, r_n$, les résistances correspondantes des tubes 1, 2, 3, ..., n ;

$i_1, i_2, i_3, \dots, i_n$, les intensités dans ces tubes; on aura

$$u = r_1 i_1 + \frac{d\Phi_{12}}{dt} + \frac{d(\Phi \text{ extérieur au tube 2})}{dt},$$

$$u = r_2 i_2 + \frac{d(\Phi \text{ extérieur au tube 2})}{dt};$$

d'où par soustraction

$$(1) \quad \left\{ \begin{array}{l} r_2 i_2 = r_1 i_1 + \frac{d\Phi_{12}}{dt} \\ \text{On trouve de même} \\ r_3 i_3 = r_2 i_2 + \frac{d\Phi_{23}}{dt}, \\ r_4 i_4 = r_3 i_3 + \frac{d\Phi_{34}}{dt}, \\ r_n i_n = r_{n-1} i_{n-1} + \frac{d\Phi_{n-1,n}}{dt} \end{array} \right.$$

avec

$$(1)' \quad u = r_n i_n + \frac{d\Phi_e}{dt},$$

Φ_e désignant le flux extérieur commun à tous les filets tubulaires du conducteur.

» Soient

$$\varphi_{12}, \quad \varphi_{23}, \quad \dots, \quad \varphi_{n-1,n},$$

les perméances offertes respectivement aux flux

$$\Phi_{12}, \quad \Phi_{23}, \quad \dots, \quad \Phi_{n-1,n}.$$

» On a

$$(2) \quad \left\{ \begin{array}{l} \Phi_{12} = 4\pi \varphi_{12} i_1, \\ \Phi_{23} = 4\pi \varphi_{23} (i_1 + i_2), \\ \Phi_{n-1,n} = 4\pi \varphi_{n-1,n} (i_1 + i_2 + \dots + i_{n-1}), \end{array} \right.$$

et les équations (1) deviennent

$$(3) \quad \left\{ \begin{aligned} r_2 i_2 &= r_1 i_1 + 4\pi \Phi_{12} \frac{di_1}{dt}, \\ r_3 i_3 &= r_2 i_2 + 4\pi \Phi_{23} \left(\frac{di_1}{dt} + \frac{di_2}{dt} \right), \\ r_4 i_4 &= r_3 i_3 + 4\pi \Phi_{34} \left(\frac{di_1}{dt} + \frac{di_2}{dt} + \frac{di_3}{dt} \right), \\ r_n i_n &= r_{n-1} i_{n-1} + 4\pi \Phi_{n-1,n} \left(\frac{di_1}{dt} + \frac{di_2}{dt} + \dots + \frac{di_{n-1}}{dt} \right), \end{aligned} \right.$$

ou

$$(4) \quad \left\{ \begin{aligned} r_2 i_2 &= r_1 i_1 + 4\pi \Phi_{12} \frac{di_1}{dt}, \\ r_3 i_3 &= r_2 i_2 + \frac{\Phi_{2,3}}{\Phi_{1,2}} (r_2 i_2 - r_1 i_1) + 4\pi \Phi_{2,3} \frac{di_2}{dt}, \\ r_4 i_4 &= r_3 i_3 + \frac{\Phi_{3,4}}{\Phi_{2,3}} (r_3 i_3 - r_2 i_2) + 4\pi \Phi_{3,4} \frac{di_3}{dt}, \\ r_n i_n &= r_{n-1} i_{n-1} + \frac{\Phi_{n-1,n}}{\Phi_{n-2,n-1}} \\ &\quad \times (r_{n-1} i_{n-1} - r_{n-2} i_{n-2}) + 4\pi \Phi_{n-1,n} \frac{di_{n-1}}{dt}. \end{aligned} \right.$$

» On voit aisément qu'il s'établit, dès la deuxième des équations (4), une loi de récurrence entre les r_i , chacune de ces quantités dépendant des deux r_i qui la précèdent immédiatement, en venant de l'intérieur du conducteur; cette loi est forcément troublée pour la première des équations, le premier terme $r_1 i_1$, ne pouvant être précédé d'aucun autre.

» Il importe de remarquer que toutes les formules qui précèdent *n'exigent pas l'homogénéité entière* du conducteur; il suffit que chacun des filets tubulaires du conducteur ait son homogénéité personnelle. Toutes ces formules se rapportent aussi bien au *régime d'établissement* du courant qu'au *régime établi*.

» On tire immédiatement de là une construction graphique très simple donnant en *régime établi* la grandeur et la phase des vecteurs $r_1 i_1$, $r_2 i_2$, ..., $r_n i_n$ par rapport à celles du vecteur $r_1 i_1$, pris comme point de départ.

» Soit (fig. 2) un vecteur $oa = r_1 i_1$; portons normalement à oa un vecteur $ab = \omega k_{12} i_1$, en posant

$$k_{12} = 4\pi \Phi_{12};$$

d'après la première des équations (3), le vecteur ob représente $r_2 i_2$ en grandeur et en phase. Suivons de même l'équation (2) : nous

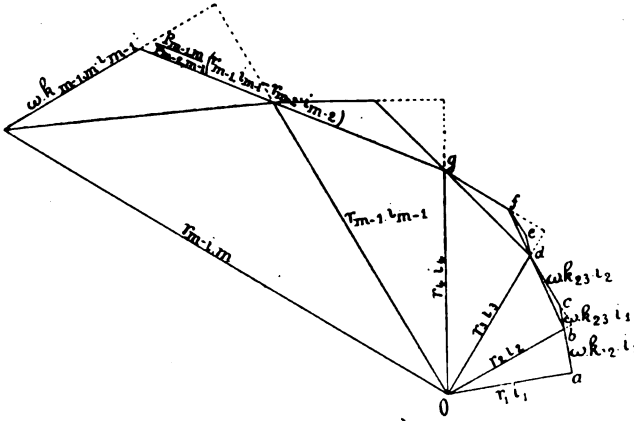


Fig. 2.

devons porter à partir de b dans le prolongement de ab un vecteur $bc = \omega k_{23} i_1$,

$$\left\{ \begin{array}{l} k_{23} = 4\pi \varphi_{23} \\ \dots\dots\dots \\ k_{n-1,n} = 4\pi \varphi_{n-1,n} \end{array} \right\},$$

puis à partir du point c et normalement à $ob = r_2 i_2$ un vecteur $cd = \omega k_{23} i_2$; le vecteur résultant $od = r_3 i_3$.

» Pour obtenir le vecteur $r_4 i_1$, il faut de même, d'après la troisième équation (3), porter à partir de d un vecteur $de = \omega k_{34} i_1$ et parallèle à ab , puis un vecteur $ef = \omega k_{34} i_2$, et parallèle à cd , et un vecteur $fg = \omega k_{34} i_3$ et normal à $od = r_3 i_3$; on a ainsi le vecteur résultant $og = r_4 i_1$.

» La construction que nous venons d'indiquer et aussi les équations (4) montrent qu'on aurait obtenu plus directement ce vecteur og en composant avec $od = r_3 i_3$ un vecteur of en phase avec le vecteur $bd = r_3 i_3 - r_2 i_2$ et égal à

$$\frac{\varphi_{34}}{\varphi_{23}} (bd),$$

puis en composant avec ces deux vecteurs od et df le troisième vecteur $fg = \omega k_{34} i_3$.

» Et cette règle est générale; on obtiendra un vecteur quel-

conque tel que $r_m i_m$ en composant avec le vecteur $r_{m-1} i_{m-1}$, deux autres vecteurs : l'un égal à la différence vectorielle des vecteurs $r_{m-1} i_{m-1}$ et $r_{m-2} i_{m-2}$, réduite dans le rapport $\frac{\mathcal{P}_{m-1,m}}{\mathcal{P}_{m-2,m-1}}$, l'autre étant égal à $\omega k_{m-1,m} i_{m-1}$ et normal au vecteur $r_{m-1} i_{m-1}$.

» Il est intéressant d'établir entre les *densités* de courant les relations correspondantes à celles que nous venons d'établir pour les *intensités*.

» Soient :

$\delta_1, \delta_2, \delta_3, \dots, \delta_n$, ces densités pour les différents tubes;
 $c_1, c_2, c_3, \dots, c_n$, les conductances correspondantes;
 γ , la conductibilité du conducteur supposé *homogène*.

Pour un tube quelconque de section s et de longueur l ,

$$(5) \quad ri = \frac{i}{c} = \frac{il}{s\gamma} = \frac{\delta l}{\gamma};$$

$$(6) \quad \frac{di}{dt} = \frac{cl}{\gamma} \frac{d\delta}{dt};$$

en remplaçant dans les équations (4) il vient

$$(7) \quad \left\{ \begin{array}{l} \delta_2 = \delta_1 + 4\pi \mathcal{P}_{1,2} c_1 \frac{d\delta_1}{dt}, \\ \delta_3 = \delta_2 + \frac{\mathcal{P}_{2,3}}{\mathcal{P}_{1,2}} (\delta_2 - \delta_1) + 4\pi \mathcal{P}_{2,3} c_2 \frac{d\delta_2}{dt}, \\ \delta_4 = \delta_3 + \frac{\mathcal{P}_{3,4}}{\mathcal{P}_{2,3}} (\delta_3 - \delta_2) + 4\pi \mathcal{P}_{3,4} c_3 \frac{d\delta_3}{dt}, \\ \delta_n = \delta_{n-1} + \frac{\mathcal{P}_{n-1,n}}{\mathcal{P}_{n-2,n-1}} (\delta_{n-1} - \delta_{n-2}) + 4\pi \mathcal{P}_{n-1,n} c_{n-1} \frac{d\delta_{n-1}}{dt}. \end{array} \right.$$

» Ces équations (7) s'appliquent aussi à la fois au régime d'établissement et au régime établi; mais uniquement pour un conducteur *homogène*.

» Et nous aurons pour les δ en régime établi une construction tout à fait identique à celle trouvée pour les ri , lesquels sont d'ailleurs proportionnels aux δ

$$\delta = \frac{\gamma}{l} ri.$$

» REMARQUES. — a. On retrouve par ces équations un premier

résultat connu intéressant : δ_2 ne dépend que de δ_1 , lequel est pris arbitrairement comme unité, et du produit $\varphi_{12} c_1 \frac{d\delta_1}{dt}$. Or la grandeur φ_{12} est égale à une constante (résultant du mode de division choisi) multipliée par μ ; la grandeur c_2 est égale à une constante (dépendant aussi de la division) multipliée par γ , et le terme $\frac{d\delta_1}{dt}$ introduit la pulsation ω ; il en résulte que, pour un δ_1 donné, la valeur de δ_2 dépend uniquement du produit $\omega\mu\gamma$; il en est de même pour δ_3 qui ne dépend que de δ_1 , de δ_2 , de $\frac{\varphi_{23}}{\varphi_{12}} \varphi_{12}$ qui est un simple coefficient numérique, et du produit $\varphi_{23} c_2 \frac{d\delta_2}{dt}$, lequel introduit encore le même produit $\omega\mu\gamma$. On voit ainsi, de proche en proche, que :

» *La distribution du courant pour toute la section du conducteur homogène dépend uniquement du produit $\mu\omega\gamma$, et ceci quel que soit le mode d'espacement choisi entre les tubes de courant.*

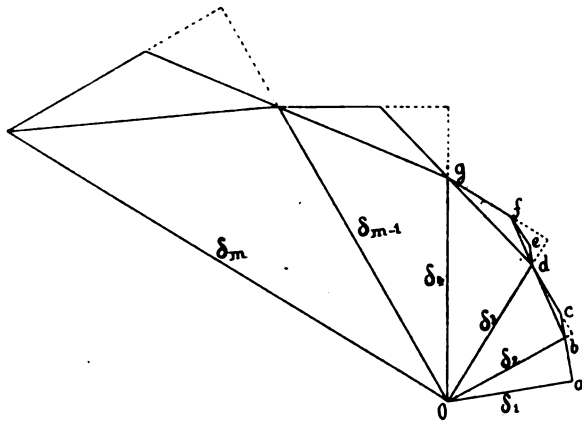


Fig. 3.

» *b.* Construisons (fig. 3) pour les densités le diagramme correspondant à celui que nous avons tracé pour les ri . Nous aurons, à l'échelle près (modifiée suivant le rapport γ_i), le même diagramme qu'en figure 2.

» Ce diagramme montre aussitôt qu'on a

$$oc > ob > oa,$$

oc étant une oblique plus écartée que ob du pied de la perpendi-

culaire oa sur ac ; puis

$$od > oc$$

pour une raison analogue. Il en résulte

$$\delta_1 < \delta_2 < \delta_3.$$

» On trouve en continuant ainsi de proche en proche

$$(8) \quad \delta_1 < \delta_2 < \delta_3 < \delta_4 \dots < \delta_n,$$

c'est-à-dire que *la densité de courant va en croissant continuellement en allant de l'intérieur vers l'extérieur du conducteur.*

» *c.* On voit également aisément, de façon purement géométrique, d'après les figures 2 ou 3, que *le déphasage en avant du courant par rapport à la densité au centre augmente au fur et à mesure qu'on approche de la périphérie.*

» *d.* Considérons les équations (7) qui montrent comment la densité δ_m dans le tube de courant d'ordre m est liée aux densités δ_{m-1} et δ_{m-2} dans les deux tubes qui précèdent immédiatement le tube considéré en partant du centre

$$(9) \quad \delta_m - \delta_{m-1} = \frac{\mathcal{P}_{m-1,m}}{\mathcal{P}_{m-2,m-1}} (\delta_{m-1} - \delta_{m-2}) + 4\pi \mathcal{P}_{m-1,m} c_{m-1} \frac{d\delta_{m-1}}{dt};$$

puis rendons de plus en plus fin le mode de division du conducteur; x étant le rayon du tube de densité δ_{m-1} , nous pouvons écrire

$$\frac{\mathcal{P}_{m-1,m}}{\mathcal{P}_{m-2,m-1}} = 1 - \frac{dx}{x} + \eta_1 dx^2 \quad (1)$$

(¹) En effet

$$\frac{\mathcal{P}_{m-1,m}}{\mathcal{P}_{m-2,m-1}} = \frac{\log_e \left(\frac{x+dx}{x} \right)}{\log_e \left(\frac{x}{x-dx} \right)} = \frac{\log_e \left(1 + \frac{x-dx}{x} \right)}{\log_e \left(1 + \frac{dx}{x} \right)}.$$

En développant en série, on obtient

$$\begin{aligned} \frac{\mathcal{P}_{m-1,m}}{\mathcal{P}_{m-2,m-1}} &= \frac{\frac{dx}{x} - \frac{1}{2} \left(\frac{dx}{x} \right)^2 + \frac{1}{3} \left(\frac{dx}{x} \right)^3 - \dots}{\frac{dx}{x-dx} - \frac{1}{2} \left(\frac{x-dx}{dx} \right)^2 + \frac{1}{3} \left(\frac{dx}{x-dx} \right)^3 - \dots} \\ &= 1 - \frac{dx}{x} + \eta_1 dx^2. \end{aligned}$$

et

$$4\pi \mathcal{P}_{m-1,m} \cdot c_{m-1} = (4\pi\mu \cdot \gamma + \xi) dx^2 \quad (2),$$

γ étant une quantité finie et ξ tendant vers zéro en même temps que dx .

» L'équation (9) peut alors s'écrire

$$\delta_m - \delta_{m-1} = \left(1 - \frac{dx}{x} + \gamma \cdot dx^2\right) (\delta_{m-1} - \delta_{m-2}) + (4\pi\mu\xi) \cdot dx^2 \cdot \frac{d\delta_{m-1}}{dt},$$

d'où

$$\begin{aligned} \frac{(\delta_m - \delta_{m-1}) - (\delta_{m-1} - \delta_{m-2})}{dx^2} + \frac{1}{x} \frac{(\delta_{m-1} - \delta_{m-2})}{dx} - \gamma (\delta_{m-1} - \delta_{m-2}) \\ = (4\pi\mu\gamma + \xi) \cdot \frac{d\delta_{m-1}}{dt}. \end{aligned}$$

» Considérons dans cette équation δ_{m-1} comme δ et passons à la limite; elle devient

$$(10) \quad \frac{d^2\delta}{dx^2} + \frac{1}{x} \cdot \frac{d\delta}{dx} = 4\pi \cdot \mu\gamma \frac{d\delta}{dt}.$$

» Nous retrouvons ainsi l'équation de Maxwell relative aux conducteurs cylindriques; c'est là une vérification intéressante de la correction de notre mode de représentation.

» Un cas particulier est celui du mur, correspondant à $x = \infty$; l'équation (10) devient alors

$$(10)' \quad \frac{d^2\delta}{dx^2} = 4\pi\mu\gamma \frac{d\delta}{dt};$$

c'est bien là l'équation du mur, si bien utilisée par M. Boucherot.

» APPLICATIONS. — Le mode de représentation que nous venons d'exposer constitue en même temps un procédé pour le calcul de la répartition du courant alternatif dans les conducteurs.

» Pour les conducteurs cerco-cylindriques, il semble rationnel d'adopter de préférence une division en tubes de courants équidistants, la distance ε entre deux tubes consécutifs étant assez petite devant la quasi-période dans l'espace de la sinusoïde amortie donnant les amplitudes instantanées de la densité en fonction de la

(2) Voir, par exemple, la formule (14) ci-après.

distance à la périphérie; on voit aisément si cette condition est satisfaite dès le début du tracé du diagramme.

» Le rayon du premier tube peut être quelconque, mais sera pris de préférence égal à la distance entre deux tubes consécutifs ou à la moitié de cette distance.

» Nous affecterons à la conductance c_m du tube d'ordre m et de rayon x_m la section annulaire comprise entre deux cercles, l'un de rayon $\frac{x_{m+1} + x_m}{2}$, l'autre de rayon $\frac{x_m + x_{m-1}}{2}$; la valeur de c_m pour une longueur l du conducteur sera

$$(11) \quad c_m = \frac{2\pi\gamma\varepsilon}{l} x_m.$$

» Cette formule s'appliquera au tube 1 si le rayon de ce tube égale $\frac{\varepsilon}{2}$.

» On a alors

$$(12) \quad c_1 = \frac{\pi\gamma\varepsilon^2}{l}.$$

» Si au contraire (ce qui semble moins homogène comme division) on prend

$$x_1 = \varepsilon,$$

la conductance de ce tube sera

$$(12)' \quad c_1 = \frac{9}{4} \frac{\pi\gamma\varepsilon^2}{l}.$$

» La perméance de l'espace compris entre les tubes m et $m+1$ est

$$(13) \quad \mathfrak{P}_{m, m+1} = \frac{\mu l}{2\pi} \int_{x_m}^{x_{m+1}} \frac{dx}{x} = \frac{\mu l}{2\pi} \log_e \frac{x_{m+1}}{x_m},$$

et si l'on se reporte aux formules (7) par exemple, nous devons y introduire, dans les derniers termes exprimés vectoriellement, des produits

$$(14) \quad 4\pi \mathfrak{P}_{m, m+1} c_m \omega = 4\pi \omega \mu \gamma \varepsilon x_m \log_e \frac{x_{m+1}}{x_m};$$

cette expression s'appliquerait à l'expression de $\mathfrak{Z}_{n+1}$, en même

temps que le rapport

$$(15) \quad \frac{\varphi_{m,m+1}}{\varphi_{m-1,m}} = \frac{\log_e \frac{x_{m+1}}{x_m}}{\log_e \frac{x_m}{x_{m-1}}}.$$

» La méthode précédente s'applique particulièrement [jusqu'à et y compris la formule (4)] au calcul de conducteurs magnétiques et de conducteurs complexes tels entre autres que ceux composés d'un conducteur cylindrique en cuivre entourés d'un tube de fer. Il est à remarquer que lorsqu'on arrive à une partie fer, si l'on a soin de faire pour chaque tube de courant la somme vectorielle des courants intérieurs y compris celui du tube, on connaîtra pour chaque tube de flux de la partie fer les ampères-tours intérieurs et, par suite, les ampères-tours alternatifs par centimètre, d'où l'on déduira l'induction et la perméabilité dans le filet circulaire de lignes de force entourant immédiatement le tube de courant considéré, d'après une courbe donnant l'induction en fonction des ampères-tours alternatifs par centimètre; cela n'est, bien entendu, qu'approximatif, mais on ne saurait guère obtenir mieux.

» *Aux surfaces de séparation* entre deux tubes de métaux différents, les *densités de courant* δ et δ' sont dans chaque métal *proportionnelles aux conductibilités* : en effet les chutes ohmiques sont les mêmes puisque les flux extérieurs sont les mêmes; donc

$$\frac{i}{c} = \frac{i'}{c'};$$

d'où

$$(14) \quad \frac{\delta}{\delta'} = \frac{\gamma}{\gamma'};$$

en même temps, les *inductions* $\mathfrak{w}$ et $\mathfrak{w}'$ sont dans le rapport des *perméabilités*, puisque les ampères-tours intérieurs sont les mêmes

$$(15) \quad \frac{\mathfrak{w}}{\mathfrak{w}'} = \frac{\mu}{\mu'}.$$

» Ces deux règles seront appliquées dans le calcul des conducteurs complexes, lesquels pouvant présenter un effet de peau exagéré, semblent applicables dans l'établissement de rotors de moteurs d'induction.

» La méthode que nous avons exposée trouvera sans doute aussi son application dans les calculs des conducteurs employés en traction et en électrometallurgie par courants alternatifs.

» Nous n'insistons pas sur les modes de décomposition à adopter pour les conducteurs à profil compliqué; il est facile d'en imaginer de suffisamment approximatifs.

M. BUNET. — « La résistance des conducteurs traversés par du courant alternatif est affectée par l'*effet de peau*, mais on a l'habitude de négliger cet effet lorsqu'il s'agit de courant continu. Cela n'est plus permis lorsque ce courant est variable, par exemple lorsqu'on considère les rails d'un tramway ou chemin de fer électrique; ce phénomène peut devenir assez important lorsque la vitesse est élevée. La *résistivité* apparente atteint un nombre considérable de fois la *résistivité* réelle aux environs du point de contact, et peut en différer sensiblement à plusieurs centaines de mètres.

» Avec des vitesses très normales, de l'ordre de 60 km à l'heure par exemple, la *résistance* d'une section de rail, entre les roues et l'alimentation, atteint trois fois environ la *résistance* réelle si cette section a 250 m, et deux fois pour 500 m. Ceci comme ordre de grandeur, naturellement.

» Ce phénomène est d'ailleurs connu, et a déjà fait l'objet de publications. Personne ne l'ayant encore signalé à notre Société, je désirais le faire, car il serait, à mon avis, intéressant à étudier tant au point de vue théorique qu'au point de vue pratique (étincelles, électrolyse, etc.).

» En alternatif ce phénomène se superposera à l'*effet de peau* ordinaire. »

M. le PRÉSIDENT remercie M. Girault de ses intéressants développements, et M. Bunet de son utile remarque relative au courant continu.

**COMPTE RENDU, AU NOM DE LA PREMIÈRE SECTION, DE L'ÉTUDE RELATIVE
AUX PHÉNOMÈNES ÉLECTROMAGNÉTIQUES DUS À LA MISE EN COURT CIRCUIT
DES MACHINES.**

M. BRUNSWICK. — « Messieurs, la première Section du Comité avait mis à son ordre du jour, il y a bientôt deux ans, l'étude des phénomènes de surtension et de surintensité dus à la mise en court circuit des machines dynamos.

» Une première Communication très documentée de notre Collègue M. Legouez n'a pas entraîné, à notre grand regret, d'imitateurs. Certaines difficultés entravent malheureusement les études en commun. D'abord, celle que présente l'examen d'un problème aussi important dans des séances espacées où l'on doit craindre d'abuser des meilleures bonnes volontés; puis celle d'obtenir des renseignements que souvent les intéressés préfèrent ne pas répandre dans un sentiment de réserve indiscutable; et, enfin, celle de vérifier expérimentalement les faits pour appuyer l'analyse.

» Nous avions cependant recueilli quelques indications intéressantes et nombre d'encouragements.

» Mais autre chose est d'organiser des séances où quelques-uns font preuve d'une louable assiduité, d'animer la discussion, et de provoquer les réflexions ou de s'assurer des concours appuyés d'avis et d'études nettement formulés.

» Bref, l'effort que nous avons tenté portait sur un trop gros problème pour être continué avec fruit en commun, et vu aussi le peu de temps que chacun pouvait y consacrer. Nous n'avons pu aboutir, en somme, qu'à l'affirmation de l'intérêt et de la complexité du problème posé et du vague des explications tentées jusqu'alors.

» Toutefois, si les discussions collectives n'ont pas donné ce qu'on pouvait en espérer, le sujet ne vous est pas resté étranger, grâce aux initiatives personnelles de plusieurs de nos collègues. Vous avez eu, en effet, des Communications successives se rattachant, de plus ou moins près, à la même question :

» *Sur les différents coefficients d'inductance*, par M. BOUCHEROT, en avril 1910;

» *A propos des moyens de protection des réseaux*, par M. GILES, en janvier 1911;

» *Sur les phénomènes de surintensité*, par M. BUNET, en mai 1911.

» *Sur les courts circuits d'alternateurs*, par M. BOUCHEROT, en juin 1911.

» MM. Giles et Boucherot ont chacun fait allusion à une Communication de M. Miles Walker (*Sur les accidents et les efforts dont les turbo-machines peuvent être le siège*) à l'Inst. of El. Eng. (*Bulletin* d'août 1910 de cette Société); celle-ci constitue l'un des rapports les plus complets qu'on ait eus jusqu'à ces derniers temps sur la matière. La Communication de M. Miles Walker donna lieu à un débat très animé, extrêmement intéressant à consulter (voir le *Bulletin* de l'Inst. of El. Eng.); l'auteur concluait que le courant, au premier moment d'un court circuit brusque, était affecté d'un coefficient de surintensité très important : l'intensité pouvait atteindre, dans un exemple cité, 30 fois l'intensité normale au lieu de 3 fois dans le cas de la mise en court circuit normale, soit un facteur d'amplification supérieur à 10.

» En juin, M. Boucherot vous exposait que la mise en court circuit brusque d'un alternateur développe *dans le circuit inducteur une surintensité continue* d'allure exponentielle, allant en s'amortissant; cette surintensité, due à l'étouffement du flux, produisait dans l'induit des courants d'intensité considérables. Pendant le changement de régime, dans la mise en court circuit, le flux variant dans l'inducteur, il y a production d'une quantité d'électricité induite dans ce circuit sous forme de courant continu qui développe des courants alternatifs dans l'induit. Il y a proportionnalité entre ces courants; il y a, de même, production de courants continus dans les circuits d'induit, qui développent du courant alternatif dans l'inducteur; finalement, dans chaque circuit, superposition de courant continu et de courant alternatif.

» M. Boucherot annonçait aussi qu'il donnerait les formules complètes à l'appui de cette théorie au Congrès de Turin.

» C'est précisément pour ne pas attendre l'apparition, peut-être encore assez lointaine, des documents définitifs du Congrès de Turin, que la première Section du Comité (à qui nous avons

rapporté l'impression ressentie à Turin par ceux qui furent favorisés de l'audition du Mémoire de M. Boucherot ou purent en lire les épreuves à tête reposée) a jugé à propos d'appeler votre attention sur le beau travail dont notre ancien Président a gratifié la Science française en apportant la pleine lumière dans une des questions les plus complexes de la technique.

» Je n'aurai pas la témérité de reprendre le traitement même de la question, et me contenterai de recourir au texte intégral de M. Boucherot d'après sa Communication au Congrès de Turin, texte reproduit à la suite de ces remarques, et auquel les lecteurs pourront se référer. Je me bornerai à en indiquer les grandes lignes.

» Après quelques considérations générales que vous connaissez déjà par une Communication de l'auteur (*Sur les coefficients d'inductance à considérer dans un alternateur*), le court circuit brusque polyphasé est traité en détail; une partie de cette étude fait d'ailleurs l'objet de la Communication de juin déjà rappelée.

» Il suffira d'indiquer que les formules établies ont été confirmées par comparaison avec des oscillogrammes très suggestifs; l'accord entre la théorie et l'expérience a été complet : les surintensités et constantes de temps trouvées sur les oscillogrammes correspondent bien aux valeurs des coefficients qu'on peut attribuer aux machines. Les Notes annexées au Mémoire donneront le détail des calculs.

» Nous renvoyons au texte de M. Boucherot pour les résultats et conclusions auxquels il est arrivé et n'en ferons qu'une simple énumération.

» 1^o *Valeur des surintensités.* — L'inducteur est le siège d'une surintensité continue $J \frac{L_1}{N_1}$ et d'une surintensité alternative ayant presque cette valeur comme maximum. Le rapport $\frac{L_1}{N_1}$ peut être de l'ordre de grandeur 10 sur un alternateur de turbine.

» L'intensité dans l'inducteur atteint donc momentanément 20 fois l'intensité normale J .

» L'intensité efficace dans l'induit atteint 10 fois I_{cc} , lequel peut déjà être 2 à 3 I_N (I_N étant, en charge, l'intensité normale).

» A ce courant alternatif se superpose un courant continu

dépendant du moment de fermeture du court circuit, et pouvant atteindre, en valeur, le maximum du courant alternatif.

» Dans les alternateurs volants, à cause de la plus grande importance des fuites, le rapport $\frac{E_1}{V_1}$ n'atteint guère que 3 ou 4 au plus.

» La valeur des surintensités n'est pas modifiée par la présence d'un amortisseur.

» 2^o *Durée des surintensités.* — Si l'on se propose de définir t , le temps au bout duquel la surintensité est réduite au $\frac{1}{10}$ de sa valeur initiale, il faut que l'exposant de l'exponentielle ait pour valeur 2, 3 et qu'on ait, par suite, $\frac{R_1}{N_1} t = 2, 3$ pour la surintensité qui dure le plus longtemps : continue dans l'inducteur, et alternative dans l'induit.

» On trouve que la durée t , ainsi définie est de 1 à 3 secondes pour un turbo-alternateur. La durée de la surintensité alternative dans l'inducteur est 2 ou 3 fois moindre.

» La durée de la surintensité (continue dans l'inducteur et alternative dans l'induit) est réduite de moitié par la présence d'un amortisseur; la durée de l'autre n'est pas atténuée.

» 3^o *Conséquences.* — Les conséquences des surintensités sont connues; leurs effets mécaniques surtout sont désastreux : les flexions des têtes de bobines sous les efforts instantanés énormes, provoquent le bris des isolants, des contacts entre fils et enfin de véritables déflagrations.

» L'amarrage des conducteurs joue un rôle important dans la construction.

» La grande puissance développée instantanément sur les organes mécaniques est encore à considérer.

» Enfin la self-inductance de l'excitatrice ⁽¹⁾ peut entraîner des surtensions dangereuses pour l'inducteur, par ce motif que cette self-inductance de l'excitatrice n'est pas négligeable.

» Si la self-inductance de l'excitatrice est, par exemple, le quart

(1) La grande surintensité continue dans l'excitatrice a souvent pour effet d'en renverser la polarité. Cette machine se trouve ainsi, en somme, mise en court circuit elle-même pendant les premiers instants du court circuit sur l'alternateur (remarque postérieure consécutive d'une observation de M. A. Halleux dans la discussion qui a suivi).

de l'inductance des fuites totales N_1 , la tension efficace aux bornes de l'excitatrice et de l'inducteur peut atteindre des milliers de volts pour un inducteur excité sous 100 volts.

» Il faut donc isoler les inducteurs en conséquence.

» Le principe qu'on peut tirer de ces considérations se résume ainsi : Il y a intérêt, pour réduire les surintensités de court circuit, à augmenter franchement les fuites de l'alternateur dans l'inducteur comme dans l'induit, contrairement à ce qu'on recherche dans les alternateurs usuels.

» L'emploi des bobines de self-inductance, proposé déjà comme palliatif, est indiqué théoriquement, soit pour l'induit, soit pour l'inducteur, l'augmentation de L_1 ou de L_2 ayant pour effet d'augmenter N_1 et N_2 ; on y a déjà songé pour l'induit, mais ces palliatifs sont peu recommandables en pratique.

» Pour l'inducteur, ce ne serait évidemment pas pratique; ce serait même dangereux à cause des surtensions aux bornes de celui-ci et de l'excitatrice pendant le court circuit. On ne peut pas toujours les employer dans l'induit.

» 4^o *Court circuit brusque sur une phase.* — Dans cette partie du Mémoire et les Notes correspondantes, M. Boucherot analyse successivement le régime permanent en court circuit monophasé, puis l'état variable qui suit le court circuit brusque sur une phase d'un alternateur diphasé, sans amortisseur et avec amortisseur.

» Il a ainsi déterminé, pour un alternateur diphasé avec et sans amortisseur, dont une phase est en court circuit, les formes approchées, en régime permanent, du courant inducteur, du courant de court circuit, de la f. e. m. pour la phase restée ouverte; puis, enfin, ces formes dans l'état variable qui suit le court circuit brusque sur une phase du même alternateur.

» *État permanent.* — Pour l'état permanent, le courant efficace dans la phase en court circuit est toujours plus grand que dans l'hypothèse où le courant inducteur est constant.

» Sans amortisseur, il est d'autant plus grand que les fuites sont plus petites (entre 1, 5 et 2 fois I_{2cc} pour les valeurs pratiques de $\frac{L_1}{N_1}$).

» Avec amortisseur, il est voisin de $2 I_{2cc}$.

» La conclusion la plus essentielle concerne la tension dans la phase restée ouverte qui dépend des circonstances. Avec amortisseur, les valeurs maxima et efficaces de cette tension sont plus petites qu'avec les deux phases ouvertes, tandis que, sans amortisseur, la valeur efficace de cette tension peut être plus grande ou plus petite, tandis que la valeur maxima est *toujours plus grande*.

» *État variable.* — A l'état variable, sans amortisseur, les constantes de temps sont de la forme curieuse $\frac{R}{\sqrt{LN}}$ et le facteur de surintensité de la forme $\sqrt{\frac{L}{N}}$.

» La courbe du courant inducteur a une allure très variable avec l'époque de fermeture du court circuit, contrairement à ce qui se passe dans le court circuit polyphasé.

» Les courbes auxquelles on arrive sont données dans le *Bulletin*. Leur allure est encore tout à fait conforme à celle des courbes relevées expérimentalement.

» Ce qui frappe le plus, c'est la durée bien plus grande de l'état variable dans le court circuit monophasé.

» *Tension dans la phase restée ouverte.* — La théorie indique qu'avec un amortisseur la tension *maxima* dans la phase ouverte qui est ωMJ avant le court circuit, diminue constamment pendant l'état variable.

Sans amortisseur, elle peut atteindre des valeurs considérablement plus grandes.

S'il n'y avait pas saturation magnétique pour un turbo-alternateur, cette tension maxima pourrait atteindre 10 à 20 fois la tension maxima à vide suivant le moment du court circuit.

» Pratiquement, la saturation magnétique et l'amortissement *toujours existant*, mais plus ou moins parfait, réduisent la surtension, même quand il n'y a pas d'amortisseur qualifié.

» *Courts circuits partiels.* — Les courts circuits partiels peuvent évidemment produire des surintensités continues et alternatives pendant l'état variable, mais de moindre importance. Ils peuvent aussi provoquer dans l'état variable comme dans le régime permanent, d'autres surtensions dangereuses dans l'inducteur.

» Des courts circuits partiels dans une machine multipolaire peuvent donner lieu à des surtensions dans l'inducteur, en dehors de toute self-inductance dans la source d'excitation.

» Il peut ainsi se développer des f. e. m. égales et contraires dans un circuit sans courant de circulation, mais pouvant soumettre les isolants à des tensions relativement dangereuses ou imprévues; de même, des f. e. m. inégales et opposées peuvent donner lieu à une tension entre fils qui peut être funeste.

» M. Boucherot signale deux cas où des courts circuits partiels dans l'induit peuvent déterminer une situation de cette nature :

» On trouvera dans le texte de M. Boucherot les conclusions extrêmement intéressantes qu'il a déduites de sa magistrale étude.

» A ces conclusions il nous sera permis d'ajouter quelques réflexions.

» Il est certain que les constructeurs de turbo-dynamos et les exploitants, jusque dans ces derniers temps, ont fait preuve de persévérance et de confiance en l'avenir en ne se lassant pas d'écoles parfois douloureuses.

» Les craintes qui s'imposaient à leur esprit étaient dues surtout à l'ignorance exacte de l'origine des dangers et des moments où ils pouvaient se manifester et, par suite, des moyens de les combattre efficacement.

» L'étude de la partie mécanique des turbo-machines avait déjà conduit les constructeurs à pousser l'examen des problèmes s'y rapportant et aujourd'hui résolus, à un point tel que les appareils actuels peuvent être considérés sans exagération comme des engins de grande précision, en posant l'usage exclusif de matières de premier choix et de moyens d'exécution impeccables. Combien, par contre, ces mêmes constructeurs étaient moins bien armés quant aux phénomènes électriques avec leurs effets aussi décevants que nouveaux.

» L'analyse des faits était, semblait-il, inextricable; M. Boucherot en a entrepris une véritable synthèse et triomphé de toutes les difficultés.

» Il a pu montrer combien la théorie qu'il établissait concordait avec l'expérience et les constatations de la pratique.

» Nous lui devons une grande reconnaissance des vues si pleines

de clarté et des conclusions qu'il en a déduites dans une si grave question.

» Grâce à lui, nous savons aujourd'hui que les phénomènes électromagnétiques dus à la mise en court circuit brusque partielle ou totale des machines sont inévitables et que leur amplitude est considérable; nous pouvons maintenant les évaluer avec leurs conséquences,

» La leçon qui se dégage de la théorie établie par M. Boucherot peut être synthétisée de façon frappante, en disant que l'étouffement d'un flux important ne peut se produire sans manifestations toujours graves; et d'une importance telle que les machines doivent être traitées et étudiées avec les préoccupations d'efforts et d'actions électromagnétiques exceptionnellement grands.

» A défaut de moyens préventifs, nous avons appris, tout au moins, l'intérêt de constituer les machines en y réservant des fuites bienfaisantes qui feront l'office de soupapes de sécurité; nous savons aussi que les amortisseurs réduisent toujours l'amplitude des effets.

» Un autre enseignement nous paraît encore à retenir, pour les turbo-machines: c'est l'avantage des machines à grande chute de tension avec la charge, c'est-à-dire à faible valeur du courant de court circuit permanent, complétées par des moyens corrélatifs de réglage de tension.

» La première Section, n'ayant pu mieux faire par elle-même, a jugé opportun de charger son Président d'être son porte-parole pour vous signaler l'intérêt qu'elle avait pris aux récents travaux de M. Boucherot.

» Ce devoir m'était d'un accomplissement facile et c'est avec plaisir que j'ai accepté cette occasion de témoigner mon amical dévouement à notre collègue; puissé-je avoir fait la mise en pages de son Mémoire sans qu'il ait à y reprendre et sans vous avoir importunés.

» En tous les cas, la Société des Électriciens se devait à elle-même de consacrer, par la publicité de son *Bulletin* et comme faisant partie du patrimoine de la Science française, une œuvre qui fait si grand honneur à la technique et à la science de son auteur ».

**LES PHÉNOMÈNES ÉLECTROMAGNÉTIQUES QUI RÉSULTENT DE LA MISE
EN COURT CIRCUIT BRUSQUE D'UN ALTERNATEUR.**

« L'usage des puissants alternateurs à grande vitesse angulaire mus par turbines à vapeur, a mis en évidence, depuis quelques années, l'importance de phénomènes accessoires qui étaient jusqu'alors passés presque inaperçus avec les alternateurs ordinaires à grand nombre de pôles.

» Au point de vue purement électromagnétique, ce qui caractérise en effet le turbo-alternateur, c'est la petitesse des fuites magnétiques qu'entraîne le petit nombre de pôles. Alors que dans un alternateur-volant, l'ensemble des fuites de l'inducteur et de l'induit dépasse souvent, pour un pôle, 50 pour 100 du flux utile par pôle, dans un turbo-alternateur il n'est pas rare que ce rapport reste inférieur à 10 pour 100.

» Je me propose d'examiner ici, aussi succinctement que possible, quelques-uns des cas singuliers qui peuvent se produire en pratique.

» De prime abord, l'apparence des phénomènes est très compliquée : c'est ce qui frappe le plus lorsque l'on se trouve mis en présence de relevés oscillographiques obtenus par l'expérience. Mais, par une discussion serrée, et en négligeant quelques faits secondaires peu importants, on parvient à voir assez clairement ce qui peut se passer dans les différents cas, sans avoir recours à autre chose qu'aux notions les plus connues de la Physique.

» Afin de ne pas rebuter ceux des lecteurs qui désirent seulement avoir une idée d'ensemble de la question, je n'ai mis que très peu de calculs dans le texte principal : les développements mathématiques sont renvoyés dans des Notes annexées que le lecteur pourra étudier à part si bon lui semble.

» Avant d'entrer dans le vif du sujet, il est nécessaire de préciser la signification de quelques expressions qui seront employées au cours de ce Mémoire et dont une nette distinction est indispensable à la compréhension de ce qui suivra.

**I. — Des divers coefficients d'inductance qu'il y a lieu de considérer
pour un des circuits d'un alternateur.**

» On entend souvent par coefficient de self-induction, ou self-inductance d'un circuit, des choses très différentes. Il vaut mieux, si l'on veut se faire comprendre, employer des expressions différentes pour des choses différentes. A défaut d'une entente internationale à ce sujet, qui est encore à venir, je me conforme aux règles qui découlent des considérations qui vont suivre.

» Lorsqu'un circuit électrique est seul ou en présence d'autres circuits ouverts, ce qui revient au même si les effets de capacité sont négligeables, il a un coefficient

de self-inductance L et c'est tout. Ce coefficient est défini par le produit nF du nombre de spires n du circuit par le flux magnétique F qu'il embrasse lorsqu'il est parcouru par un courant égal à une unité C. G. S., c'est-à-dire 10 ampères. C'est là son coefficient de self-induction, ou sa self-inductance, et il n'y a pas lieu d'appliquer cette expression à autre chose.

» Mais si les autres circuits sont fermés sur eux-mêmes, ou sur quoi que ce soit, il y a d'autres coefficients à envisager utilement pour le premier circuit considéré et par conséquent aussi pour chacun des autres.

» Considérons d'abord le cas simple où deux circuits électriques sont en présence et fixes dans un milieu de conformation magnétique invariable (transformateur). Ils ont chacun un coefficient de *self-inductance*, L_1 pour le primaire, L_2 pour le secondaire, défini comme il vient d'être dit, l'autre étant ouvert.

» S'ils ont entre eux un coefficient de mutuelle inductance M correspondant à la portion du flux émis par l'un d'eux, embrassée par l'autre; de ce fait, ils ont des coefficients de *self-inductance de fuites*, $\mathcal{L}_1$ pour le primaire, $\mathcal{L}_2$ pour le secondaire, donnés par les relations

$$\mathcal{L}_1 = L_1 - \frac{n_1}{n_2} M,$$

$$\mathcal{L}_2 = L_2 - \frac{n_2}{n_1} M.$$

» Enfin si l'un des circuits est supposé alimenté lorsque l'autre est fermé sur lui-même en court circuit, il a une self-inductance apparente très différente de sa self-inductance véritable et de sa self-inductance de fuites ; ce n'est pas, à proprement parler, une self-inductance, puisque alors la mutuelle intervient; c'est une inductance ; et comme dans ces conditions, le flux qu'embrasse ce circuit est la somme des flux de fuites des deux, j'emploie pour ce coefficient apparent l'expression d'*inductance des fuites totales* ramenées dans ce circuit. Cette inductance peut être envisagée pour l'un ou l'autre des circuits et a les valeurs suivantes :

$$N_1 = L_1 - \frac{M^2}{L_2} \quad \text{au primaire,}$$

$$N_2 = L_2 - \frac{M^2}{L_1} \quad \text{au secondaire.}$$

» On trouvera dans la Note annexée n° 1 quelques explications et justifications à l'appui de ce que je viens de dire.

» Il y a donc, indépendamment du coefficient de mutuelle inductance, trois coefficients d'inductance à considérer pour chacun des circuits.

» Mais il ne s'agit là que d'un transformateur statique dans lequel la mutuelle induction est constante. Que deviennent ces coefficients pour un alternateur dans lequel la mutuelle est variable avec le temps ?

» La réponse n'est pas simple. Elle dépend à la fois des circuits qu'on envisage

et de la nature de l'alternateur quant au nombre de phases et à la constitution de l'inducteur.

» Plaçons-nous d'abord au point de vue du circuit inducteur seul.

» Il se trouve heureusement que pour un alternateur diphasé, placé, bien entendu, dans des conditions telles qu'il puisse être toujours considéré comme système diphasé et dénué d'harmoniques, les trois coefficients d'inductance conservent entièrement leurs significations et leurs valeurs pour le *circuit inducteur*, avec cette seule modification que M est le maximum du coefficient de mutuelle inductance de ce circuit avec chacun des circuits d'induit (*voir* Note annexée n° 2).

» Il en va de même évidemment pour tout autre alternateur polyphasé sous réserve du changement que peut apporter aux valeurs numériques la mutuelle induction constante entre les circuits d'induit. L'alternateur diphasé est le seul, en effet, des alternateurs polyphasés dans lequel les circuits d'induit n'aient pas de mutuelle inductance entre eux ; pour cette raison, il est toujours plus commode d'établir les théories générales concernant les alternateurs polyphasés au moyen du diphasé pris comme type.

» Ainsi, en résumé, pour un alternateur polyphasé, les trois coefficients d'inductance du circuit inducteur conservent les significations et valeurs symboliques qu'ils ont pour l'un des circuits d'un transformateur statique monophasé.

» Il n'en est plus de même malheureusement pour un alternateur monophasé. Bien qu'en apparence plus simple, cet appareil conduit toujours à des résultats plus complexes quand on veut en approfondir l'étude. La self-inductance de chacun des deux circuits, inducteur et induit, peut être et est généralement constante, mais la self-inductance de fuites et l'inductance des fuites totales ne sont plus constantes : ce sont des fonctions périodiques du temps, et, de ce fait, tous les problèmes se trouvent compliqués (*voir* Note annexée n° 3).

» Plaçons-nous maintenant au point de vue des circuits induits.

» On voit immédiatement que même si l'alternateur est polyphasé, *s'il n'y a qu'un circuit inducteur*, les coefficients d'inductance de fuites ne sont pas constants pour les circuits d'induit. Dans le cas du diphasé, par exemple, l'un des circuits induits n'a de mutuelle induction qu'avec le circuit inducteur ; il se trouve donc, en ce qui concerne ses coefficients de fuites, dans la même situation que l'inducteur d'alternateur monophasé que nous venons d'envisager précédemment.

» Il en est tout autrement si le système inducteur possède un autre circuit fermé sur lui-même en quadrature avec le circuit inducteur, et que nous appellerons circuit *amortisseur*. Les coefficients d'inductance de fuites des circuits induits reprennent alors la signification et la valeur qu'ils ont dans le transformateur statique, même pour un alternateur monophasé. L'inducteur constitue alors, en effet, à notre point de vue spécial, un système polyphasé ; les courants qui circulent dans ses deux circuits réagissent sur ceux de l'induit comme ceux d'un induit polyphasé réagissent sur l'inducteur.

» Résumons-nous. Si les deux parties d'un alternateur sont constituées toutes deux en systèmes polyphasés, les coefficients d'inductance de fuites conservent

les significations et les valeurs qu'ils ont dans un transformateur statique pour tous les circuits. Si une seule des parties est polyphasée, il n'en est ainsi que pour les circuits de l'autre.

» La question doit se poser maintenant de ce qu'on peut entendre par circuit amortisseur. Jusqu'ici nous avons entendu par là un circuit, non pas identique comme nombre de spires et section de fil au circuit inducteur, cela n'est pas nécessaire, mais tout au moins contenant la même quantité de cuivre disposée semblablement quoique en quadrature.

» Il est clair cependant qu'entre cet amortisseur parfait et l'absence complète d'amortissement, il y a place pour une infinité de solutions pratiques possibles qui se rapprocheront plus ou moins de l'amortissement parfait. Dans ce cas se trouveront des pôles massifs, des inducteurs feuilletés traversés par de forts boulons d'assemblage formant plus ou moins cage d'écureuil, etc.

» Pratiquement, on sera conduit à examiner ce qui se passe dans les deux cas extrêmes, avec ou sans amortisseur parfait, et à conclure suivant la nature de l'amortissement réellement existant dans l'alternateur.

II. — Court circuit brusque polyphasé.

» Un alternateur polyphasé étant à vide, le flux dans l'inducteur est constant et égal à

$$F_1 = \frac{L_1}{n_1} J,$$

où J est le courant continu d'excitation.

» Le flux tournant dans l'induit, qui est aussi le flux maximum dans chaque phase d'induit, est

$$F_2 = \frac{M}{n_2} J,$$

et la force électromotrice efficace par phase

$$E_2 = \frac{\omega MJ}{\sqrt{2}}.$$

» Lorsque cet alternateur est en court circuit sur toutes ses phases depuis longtemps le courant efficace par phase est

$$I_{2cc} = \frac{E_2}{\omega L_2} = \frac{MJ}{\sqrt{2} L_2},$$

en négligeant la résistance devant la réactance.

» Les flux sont alors considérablement réduits.

» Dans l'induit le flux est nul puisqu'on suppose les enroulements sans résistance : le flux dans l'induit est la résultante du flux de fuites d'induit et d'un flux égal et contraire que lui envoie l'inducteur.

» Dans l'inducteur le flux est la résultante du flux de fuites de l'inducteur et du flux de fuites d'induit changé de signe. Par un calcul identique à celui fait dans la Note annexée n° 1 pour le transformateur, on trouve ainsi pour ce flux inducteur

$$F_{icc} = \frac{J}{n_1} N_1.$$

» Il y a donc pendant le changement de régime, pendant l'état variable qui suit immédiatement la mise en court circuit brusque, une variation de flux dans l'inducteur

$$F_1 - F_{icc} = \frac{J}{n_1} (L_1 - N_1).$$

» Si la résistance du circuit inducteur est R_1 , il en résulte une quantité d'électricité induite dans ce circuit

$$\frac{J(L_1 - N_1)}{R_1}$$

qui se manifeste sous forme d'un *courant continu*. Ce courant s'amortit sous la forme exponentielle, mais il peut atteindre dans les premiers instants des valeurs considérables ; les courants alternatifs de court circuit dans l'induit atteignent de ce fait, eux aussi, des valeurs considérables, puisque en court circuit, il y a proportionnalité entre les courants induits et le courant inducteur.

» Que l'alternateur ait peu ou beaucoup de fuites, la quantité d'électricité induite dans l'inducteur pendant l'état variable reste à peu près la même, car les fuites ne font varier que N_1 , petit devant L_1 ; mais ce qui change grandement avec l'importance des fuites, c'est l'allure de l'exponentielle qui représente

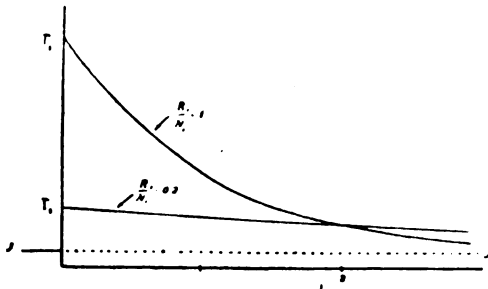


Fig. 1.

le courant. Pour une même quantité d'électricité, cette exponentielle peut être plus ou moins inclinée sur l'axe des temps, suivant que la *constante de temps* du circuit inducteur est plus ou moins grande (fig. 1).

» Si l'induit était ouvert, la constante de temps du circuit inducteur serait $\frac{R_1}{L_1}$.

Comme l'induit est fermé sur lui-même, la constante de temps à prendre est $\frac{R_1}{N_1}$.

» Le courant continu induit dans l'inducteur est donc de la forme

$$\Gamma_1 e^{-\frac{R_1}{N_1} t}$$

(où ε est la base des logarithmes népériens) et la quantité d'électricité induite lui est reliée par la formule

$$\int_0^\infty \Gamma_1 \varepsilon^{-\frac{R_1}{N_1} t} dt = \frac{J(L_1 - N_1)}{R_1},$$

d'où la valeur de ce courant au début Γ_1 :

$$\Gamma_1 = J \frac{L_1 - N_1}{N_1}.$$

» Le courant continu total dans l'inducteur, au premier instant du court circuit, est donc

$$J + \Gamma_1 = J \frac{L_1}{N_1},$$

et le courant efficace dans chaque phase d'induit

$$\frac{MJ}{\sqrt{2} L_2} \frac{L_1}{N_1} = \frac{MJ}{\sqrt{2} L_2} \frac{L_2}{N_2} = \frac{MJ}{\sqrt{2} N_2} \quad (1).$$

» Nous n'avons fait aucune hypothèse sur la constitution du système inducteur ; ce résultat est donc le même, qu'il y ait ou non un circuit amortisseur.

» Mais le phénomène se complique de ce que, par un mécanisme analogue, des courants continus prennent naissance également dans les circuits de l'induit qui donnent lieu encore à un courant alternatif dans l'inducteur. Il y a donc finalement, dans l'inducteur et dans l'induit, superposition de courants continus et de courants alternatifs amortis.

» Les courants continus qui se développent dans les circuits d'induit n'ont pas la même importance dans tous : contrairement à celui de l'inducteur, ils dépendent dans chaque phase du moment de fermeture du court circuit.

» Supposons qu'il s'agisse d'un alternateur diphasé et que le court circuit soit produit juste au moment où le flux est maximum dans la phase A, et, par conséquent, nul dans la phase B. Il ne se produira pas de courant continu dans celle-ci ; au contraire, la quantité d'électricité induite dans la phase A aura la plus grande valeur possible.

» Le flux dans cette phase variant de $\frac{MJ}{n_1}$ à zéro et sa résistance étant R_1 , la quantité d'électricité induite y sera

$$\frac{MJ}{R_1}.$$

» Elle donnera lieu à un courant continu de la forme

$$\Gamma_2 \varepsilon^{-\frac{R_2}{N_2} t},$$

(1) Par suite de l'égalité $\frac{L_1}{N_1} = \frac{L_2}{N_2}$. Voir Note annexée n° 4.

dont la valeur initiale Γ_2 se déduira comme précédemment de

$$\int_0^\infty \Gamma_2 \varepsilon^{-\frac{R_2}{N_2} t} M = \frac{MJ}{R_2}$$

et sera

$$\Gamma_2 = \frac{MJ}{N_2}.$$

» Le courant instantané dans la phase A sera ainsi de la forme

$$i_2 = \frac{MJ}{N_2} \left[\varepsilon^{-\frac{R_2}{N_2} t} - \varepsilon^{-\frac{R_1}{N_1} t} \cos \omega t \right] + \frac{MJ}{L_2} \cos \omega t$$

et celui dans la phase B,

$$i_3 = \frac{MJ}{N_2} \varepsilon^{-\frac{R_1}{N_1} t} \sin \omega t - \frac{MJ}{L_2} \sin \omega t.$$

» (Le dernier terme de chaque expression y représente le courant de court circuit permanent.)

» Mais nous avons fait, en passant, une hypothèse sur laquelle il est nécessaire d'attirer l'attention : en admettant pour la constante de temps d'un des circuits d'induit $\frac{R_2}{N_2}$ nous avons supposé implicitement que le système inducteur est muni d'un circuit amortisseur; autrement N_2 ne serait pas constant et la forme du phénomène serait un peu plus compliquée, ainsi qu'on le verra dans la Note annexée n° 4. Restons-en là pour le moment et voyons ce qu'est le courant inducteur.

» Le courant continu dans la phase A

$$\frac{MJ}{N_2} \varepsilon^{-\frac{R_1}{N_1} t}$$

développe dans le circuit inducteur une f. é. m. Nous n'en retiendrons que la partie la plus importante

$$\frac{MJ}{N_2} \varepsilon^{-\frac{R_1}{N_1} t} \omega M \sin \omega t$$

qui donne un courant (analogue au courant de court circuit ordinaire)

$$- \frac{MJ}{N_2} \varepsilon^{-\frac{R_1}{N_1} t} \frac{M}{L_1} \cos \omega t = - \frac{L_1 - N_1}{N_1} J \varepsilon^{-\frac{R_1}{N_1} t} \cos \omega t.$$

en sorte que le courant inducteur instantané total est

$$i_1 = J \left[1 + \frac{L_1 - N_1}{N_1} \left(\varepsilon^{-\frac{R_1}{N_1} t} - \varepsilon^{-\frac{R_2}{N_2} t} \cos \omega t \right) \right].$$

» J'ai dit tout à l'heure que le raisonnement suppose un amortisseur dans

l'inducteur. On verra par la comparaison des Notes annexées n^{os} 4 et 5, dans lesquelles sont traités complètement les deux cas, sans et avec amortisseur, que sans amortisseur la constante de temps des circuits induits, au lieu d'être $\frac{R_2}{N_2}$, est sensiblement $\frac{2N_2}{R}$; il en résulte quelques changements des surintensités et de leurs durées, sur lesquels je n'insiste pas.

» Lorsque le court circuit est produit à un autre moment de la période, l'allure de ces courants d'induit change, puisque du courant continu est induit dans les deux phases, mais celle du courant inducteur ne change pas.

» Je pourrais reproduire, à l'appui des formules établies dans les Notes 4 et 5, un assez grand nombre d'oscillogrammes expérimentaux qui ont été publiés ou que l'on m'a communiqués. Mais étant donné l'accord entre l'expérience et la théorie, je préfère donner ici (fig. 2 et 3) des courbes théoriques, qui sont plus carac-

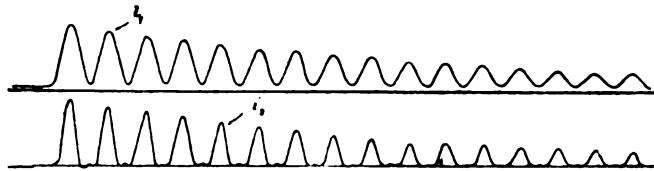


Fig. 2.

téristiques que des courbes expérimentales, parce qu'elles correspondent aux cas extrêmes sans et avec amortisseur, tandis que celles-ci sont généralement obtenues avec un amortissement imparfait.

» Pour établir ces courbes on a supposé le rapport $\frac{L_1}{N_1} = 10$, $\frac{R_1}{N_1} = 5$ et $\frac{R_2}{N_2} = 10$, ce qui correspond à un turbo-alternateur de grandes dimensions. La figure 2 suppose l'absence, la figure 3, la présence d'un amortisseur. On n'a figuré qu'un des deux

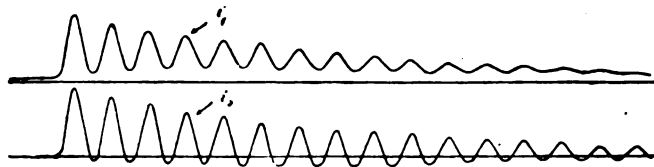


Fig. 3.

courants induits, en supposant tout le flux dans le circuit correspondant au moment du court circuit.

» Je dis que l'accord entre la théorie et l'expérience est complet. On trouve, en effet, sur les oscillogrammes des valeurs des surintensités et constantes de temps qui correspondent bien à celles qu'on peut raisonnablement attribuer aux machines ayant servi aux expériences. Il faut nécessairement, dans les expressions des inductances, tenir compte de la self-inductance de l'excitatrice, qui doit entrer dans L_1 .

» Les constantes de temps de l'inducteur et de l'induit ne sont pas les mêmes. Il y a toujours plus de fil sur l'inducteur que sur l'induit ; or, comme la résistance ne croît que comme le nombre des spires, tandis que *tous les coefficients d'inductance* croissent au moins comme le carré du nombre de spires, on doit avoir nécessairement $\frac{R_1}{N_1} > \frac{R_2}{N_2}$. Dans l'inducteur le courant alternatif doit s'amortir plus vite que le courant continu, et ce doit être le contraire dans l'induit. C'est bien en effet ce que confirme l'expérience.

» Enfin, on trouve bien sur certains oscillogrammes, pour l'induit, le courant de fréquence double de la fréquence normale, qui indique l'absence d'amortisseur ou la présence d'un amortissement imparfait.

» On constatera qu'il y a assez peu de différence entre l'exposé physique réduit que j'ai fait ici et le calcul complet pour qu'on se contente en pratique du premier, qui a l'avantage d'une compréhension facile.

» Tirons maintenant de ceci des conclusions pratiques.

» Il convient d'envisager la valeur des surintensités et leur durée.

» Dans l'inducteur se développe une surintensité continue

$$J \frac{L_1}{N_1}.$$

et une surintensité alternative ayant presque cette valeur comme maximum.

» Le rapport $\frac{L_1}{N_1}$ peut atteindre 10 pour un turbo-alternateur. L'intensité dans l'inducteur atteint donc momentanément 20 fois l'intensité d'excitation normale J .

» Dans l'induit, l'intensité efficace atteint 10 fois le courant de court circuit normal lequel peut être déjà 2 ou 3 fois le courant de pleine charge. A ce courant alternatif se superpose un courant continu qui dépend du moment de fermeture et peut atteindre en valeur le maximum du courant alternatif.

» Dans un alternateur volant ces surintensités sont bien moindres parce que le rapport $\frac{L_1}{N_1}$ n'atteint que 3 ou 4 au plus.

» Quant aux durées, il faut d'abord s'expliquer sur ce qu'on entend par là. On pourra par exemple appeler *durée*, le temps t qu'il faut pour que la surintensité soit réduite au $\frac{1}{10}$ de sa valeur initiale. Il faut pour cela que l'exposant de l'exponentielle ait pour valeur 2, 3; c'est-à-dire

$$\frac{R_1}{N_1} t_1 = 2, 3$$

s'il s'agit de la surintensité continue dans l'inducteur et alternative dans l'induit, qui est celle qui dure le plus.

» N_1 étant plus grand dans un alternateur volant que dans un turbo-alternateur (pour un même L_1), il s'ensuit que la durée serait plus grande dans le *volant* si

sa résistance R_1 était la même. Mais pour des raisons analogues à celles qui font la petitesse de N_1 , la résistance dans le *turbo* est très petite aussi, en sorte que la durée y est plus grande aussi.

» En fait, la durée de la surintensité continue dans l'inducteur, définie comme ci-dessus, est de 1, 2 ou 3 secondes pour un turbo-alternateur; la durée de la surintensité alternative, 2 ou 3 fois moindre. Celle-ci se rapproche d'autant plus de la première que la quantité de cuivre dans l'induit se rapproche de celle de l'inducteur, autrement dit que la réaction d'induit est plus grande.

» Les conséquences de ces surintensités sont déjà trop connues, hélas ! Elles durent trop peu de temps pour que l'échauffement provoqué soit dangereux, mais les effets mécaniques en sont parfois désastreux.

» Sous l'influence de ces énormes courants, les parties latérales des enroulements sont soumises à des efforts énormes qui les déforment et provoquent des contacts entre fils et à la masse, à la suite desquels des coups de feu se produisent. Les constructeurs ont ainsi été amenés à prendre des dispositions spéciales et nouvelles pour l'amarrage des conducteurs des enroulements en dehors des encoches et sur lesquelles je n'insisterai pas.

» La grande puissance mécanique absorbée momentanément en effet. Joule n'est pas non plus sans danger si certaines parties mécaniques ne sont pas très largement établies.

» Enfin, il en résulte souvent des détériorations des isolants dans l'inducteur par surtension du fait de la self-inductance de l'excitatrice. Il est nécessaire de bien préciser ce point ; si l'excitatrice n'avait aucune self-inductance, il n'y aurait aucune surtension dans l'inducteur, quelle que soit la grandeur des courants, pas plus qu'il n'y a de tension dans le secondaire d'un transformateur en court circuit quelle qu'y soit l'importance du courant.

» Supposons que la self-inductance de l'excitatrice soit, pour fixer les idées, le quart de l'inductance des fuites totales N_1 ; sa réactance pour le courant alternatif de l'inducteur est $\frac{1}{4} \omega N_1$. La valeur efficace de ce courant alternatif, dans les premiers instants, est sensiblement $\frac{J}{\sqrt{2}} \frac{L_1}{N_1}$ (exactement $\frac{J}{\sqrt{2}} \frac{L_1 - N_1}{N_1}$). La tension efficace aux bornes de l'excitatrice et de l'inducteur est donc

$$\frac{1}{4\sqrt{2}} \omega L_1 J,$$

c'est-à-dire $\frac{1}{4}$ environ de la tension qu'on aurait aux bornes d'une bobine ayant même self-inductance que la self-inductance *totale* de l'inducteur L_1 et dans laquelle on ferait passer un courant efficace J .

» Cela représente évidemment des milliers de volts pour un inducteur excité sous 100 volts. Il faut donc que l'inducteur et l'excitatrice soient isolés pour des tensions incomparablement plus grandes que celle du fonctionnement normal.

» Pour réduire les surintensités de court circuit, il y a évidemment avantage à augmenter les fuites de l'alternateur, dans l'inducteur comme dans l'induit,

contrairement à ce qu'on s'est appliqué à faire jusqu'ici pour les alternateurs. Cela n'empêche pas d'ailleurs de prendre les précautions indiquées par les considérations précédentes.

» Comme palliatif aux surintensités, pour les alternateurs existants, on a, comme il fallait s'y attendre, proposé les bobines de self-induction. Elles peuvent être appliquées théoriquement dans l'inducteur comme dans l'induit. L'augmentation de L_1 , aussi bien que celle de L_2 , a pour effet d'augmenter N_1 et N_2 , comme il résulte des formules

$$N_1 = L_1 - \frac{M^2}{L_2}, \quad N_2 = L_2 - \frac{M^2}{L_1}.$$

» Dans l'inducteur, il n'y faut pas songer pratiquement. Outre que cela obligerait à faire l'excitation sous une tension plus élevée, pour fournir la chute ohmique de la bobine de self, cela provoquerait des surtensions considérables, lors des courts circuits, aux bornes de l'excitatrice et de l'inducteur, comme je l'expliquais tout à l'heure.

» L'application de bobines de self dans les circuits de l'induit ne présente pas autant de danger, mais il ne faut pas oublier que, dans le fonctionnement normal, ces bobines absorberont une tension importante en quadrature avec le courant débité par l'alternateur, ce qui obligera celui-ci à fournir, en charge, une tension supérieure de 15 à 30 pour 100 à la tension pour laquelle il a été prévu.

» Il ne faut pas se dissimuler non plus que le prix d'acquisition de ces bobines n'est pas négligeable, étant donnée leur puissance apparente.

III. — Court circuit brusque sur une phase.

» Avant d'aborder l'étude de l'état variable qui suit la mise en court circuit brusque d'une phase d'un alternateur, il est nécessaire de dire quelques mots du régime permanent en court circuit monophasé.

» Cette question est en effet assez peu connue. On peut, en première approximation, dire que, comme dans l'alternateur polyphasé, le courant de court circuit efficace a pour valeur

$$I_{cc} = \frac{E_1}{\omega L_2}.$$

» Mais si l'on veut regarder les choses de plus près, elles sont plus complexes : les inductances de fuites sont, en effet, ainsi que nous l'avons vu plus haut, des fonctions du temps, au lieu d'être des constantes ; il s'ensuit que, dans l'inducteur et dans l'induit, des harmoniques prennent naissance en nombre infini. On peut se proposer de traiter le problème sous sa forme complète, et cela a été fait plusieurs fois. J'ai moi-même montré dans *La Lumière électrique* de 1893 que pour une charge quelconque et, par conséquent, en court circuit aussi, le courant inducteur contient tous les termes pairs de la série de Fourier et le courant induit tous

les termes impairs, et donné les expressions complètes de ces courants (sans amortisseur dans l'inducteur).

» Pour le sujet que nous avons en vue aujourd'hui, on peut procéder par simplification en négligeant les résistances des enroulements ; on arrive ainsi à se faire une idée beaucoup plus nette de ce qui se passe en évitant les développements en série. C'est ce qui est fait dans les Notes annexées n° 6 et 7, dans la première pour l'alternateur sans amortisseur, dans la deuxième pour l'alternateur avec amortisseur.

» Les figures 4 et 5 donnent les courbes des valeurs instantanées des diverses

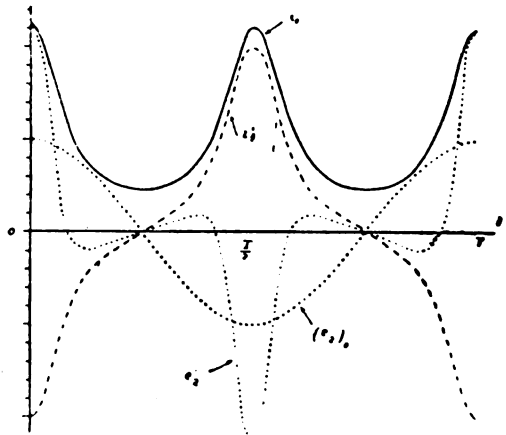


Fig. 4.

grandeurs en jeu dans ces deux cas. Ce qui frappe immédiatement quand on compare ces deux figures, c'est la disparition des harmoniques lorsqu'il y a un circuit amortisseur : les circuits d'induit ne contiennent plus, comme f. e. m. ou courant, que le terme en ωt ; le circuit inducteur et le circuit amortisseur ne contiennent plus que le terme en $2\omega t$.

» Le courant efficace dans la phase en court circuit est toujours plus grand que dans l'hypothèse où le courant inducteur est constant, c'est-à-dire plus grand que la valeur L_{2cc} , posée plus haut. Sans amortisseur, il est d'autant plus grand que les fuites sont plus petites ; il est compris entre 1,5 fois et 2 fois L_{2cc} pour les valeurs pratiques du rapport $\frac{L_1}{N_1}$. Avec amortisseur, il est très voisin de deux fois L_{2cc} . C'est ce qu'on admet généralement dans le calcul industriel des alternateurs, mais on voit ici ce que cela suppose et qu'on passe généralement sous silence.

» Quant à la tension dans la phase restée ouverte, on voit combien le résultat dépend des circonstances, puisque, avec un amortisseur, les valeurs maxima et efficace de cette tension sont toujours plus petites que celles obtenues dans les deux phases ouvertes, tandis que sans amortisseur la valeur efficace de cette tension peut être plus grande ou plus petite, et la valeur maxima est toujours plus grande.

» C'est surtout en vue de cette tension dans la phase ouverte que j'ai cru utile

d'entrer dans ces détails du court circuit monophasé permanent. On comprendra, dès maintenant, l'importance de ce point pour l'étude de l'état variable; la surintensité continue dans l'inducteur pouvant provoquer surtension dans la phase restée ouverte. Il valait donc la peine qu'on s'y arrêtât un peu.

» Les résultats des calculs des Notes 6 et 7 ne sont certainement qu'approchés, puisqu'on néglige les résistances devant les réactances, tout en n'étant que particuliers au cas où les coefficients de mutuelle inductance sont sinusoïdaux, ce qui n'est pas toujours complètement réalisé en pratique. Il ne faudrait donc pas avoir la prétention d'utiliser ces formules pour calculer *exactement* les diverses grandeurs

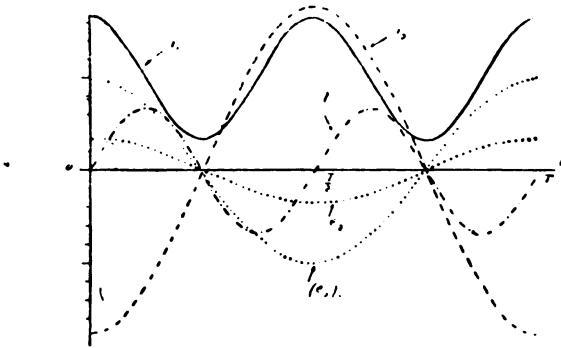


Fig. 5.

i_1 , Courant inducteur instantané; i_1' , Courant amortisseur instantané; i_2 , Courant de court circuit instantané; e_2' , Tension instantanée dans la phase ouverte; e_2'' , Tension instantanée à vide.

en jeu ; mais je pense que, comme indication générale sur le sens des phénomènes et sur la possibilité de certaines réalisations, ils peuvent être utilisés.

» La plus grosse difficulté, surtout en ce qui concerne la tension dans la phase ouverte, est certainement de discerner, pour un alternateur donné, s'il faut le considérer comme étant sans ou avec amortisseur, puisque généralement il y a un amortissement plus ou moins imparfait.

» Passons maintenant à l'état variable.

» Je n'ai pas besoin de dire que l'étude en est très pénible quand il n'y a pas d'amortisseur ; on la trouvera résumée dans la Note n° 8; celle de l'alternateur avec amortisseur dans la Note n° 9.

» Sans amortisseur, les constantes de temps sont de la forme singulière

$$\frac{R}{\sqrt{LN}},$$

et le facteur de surintensité de la forme $\sqrt{\frac{L}{N}}$.

» Dans l'un et l'autre cas, la courbe du courant inducteur change avec l'époque de fermeture du court circuit. Suivant cette époque, il y a, en effet, plus ou moins de courant continu induit dans le circuit fermé de l'induit, et, par conséquent, plus ou moins de courant alternatif dans l'inducteur.

» Aussi ai-je dû présenter, dans les figures 6 à 9, les courbes des courants inducteur et induit, non seulement avec et sans amortisseur, mais dans les deux cas extrêmes où le court circuit est fait quand le flux F_2 est nul et quand il est maximum dans la phase court circuitée.

» Les figures sont donc établies :

- » Figure 6 sans amortisseur, F_2 maximum;
 - » Figure 7 sans amortisseur, F_2 nul;
 - » Figure 8 avec amortisseur, F_2 maximum;
 - » Figure 9 avec amortisseur, F_2 nul.
- » Pour que la comparaison soit facile, on a évidemment admis pour toutes ces

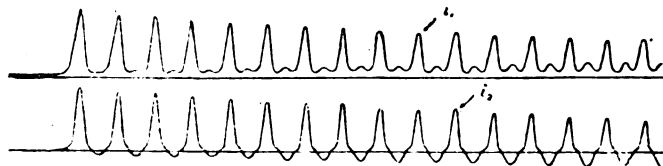


Fig. 6.

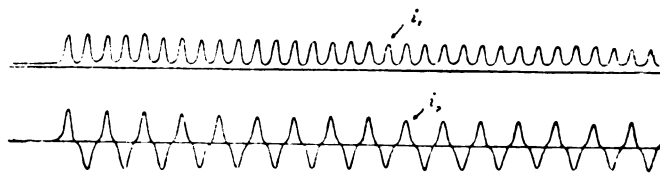


Fig. 7.

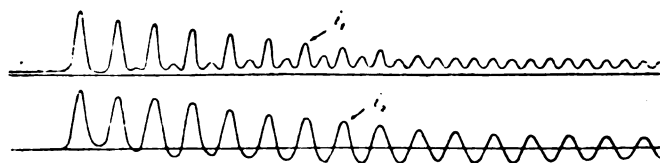


Fig. 8.

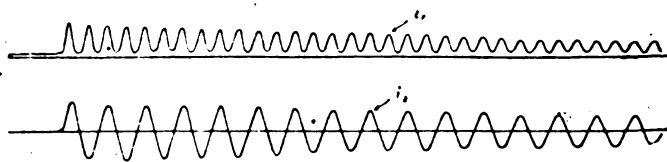


Fig. 9.

courbes le même rapport $\frac{L_1}{N_1} = 10$, et les mêmes constantes de temps $\frac{R_1}{N_1} = 5$, $\frac{R_2}{N_2} = 10$, que lors du court circuit diphasé.

» Ce qui frappe alors, c'est la durée bien plus grande de l'état variable dans le court circuit monophasé.

» Ces courbes ressemblent encore, à s'y méprendre, à certains oscillogrammes expérimentaux qui ont été publiés. Il me semble inutile de dissenter plus longuement à leur sujet.

» La conclusion la plus importante à tirer de cette partie de notre étude théorique concerne la tension dans la phase restée ouverte ; je n'en ai malheureusement pas de confirmation expérimentale, je veux dire oscillographique, mais de fortes présomptions de vérité résultant de descriptions d'accidents.

» La théorie indique qu'avec un amortisseur, la tension maxima dans la phase ouverte, qui est ωMJ avant le court circuit, diminue constamment pendant l'état variable, et qu'au contraire, sans amortisseur, elle peut atteindre des valeurs considérablement plus grandes. S'il n'y avait pas saturation magnétique, pour un turbo-alternateur, cette tension maxima pourrait atteindre de 10 à 20 fois la tension maxima à vide, suivant le moment du court circuit.

» Cette différence semble, au premier abord, presque paradoxale ; elle s'explique très bien par l'influence du courant dans l'amortisseur qui est très grand, lui aussi comme le courant inducteur. Les formules de la Note n° 9 montrent clairement que les courants i_1 et i_2 induisent dans la phase ouverte deux surtensions, égales et contraires, qui s'annulent.

» Pratiquement, la saturation magnétique d'une part, la présence d'un amortissement plus ou moins imparfait d'autre part, ont certainement pour effet de réduire la surtension dans la phase ouverte, même quand il n'y a pas d'amortisseur. Cette surtension peut encore néanmoins être assez grande : je n'en veux pour preuve que le grand nombre de coups de feu qui se sont produits sur phases ouvertes lors de courts circuits monophasés en ligne.

IV. — Courts circuits partiels.

» Il est évident que si, pour une raison quelconque, un court circuit se produit dans une portion seulement de l'enroulement induit, sur une bobine quand il y en a plusieurs, ou même sur une fraction de bobine, il en résulte encore des surintensités continues et alternatives pendant l'état variable, mais de moindre importance.

» Il n'est pas inutile de faire remarquer que ces courts circuits *partiels*, aussi bien pendant l'état variable qu'en régime établi, peuvent provoquer des surtensions dangereuses dans l'inducteur.

» Nous avons vu précédemment qu'à cause de la self-inductance de l'excitatrice un court circuit sur l'ensemble d'une phase, ou de deux, sur la ligne par exemple, peut provoquer des tensions alternatives élevées aux bornes extrêmes de l'inducteur et de l'excitatrice. Mais, ainsi que je l'ai déjà dit, ces surtensions ne résultent que de cette self-inductance de l'excitatrice ; avec une source d'excitation sans self-inductance il n'y aurait rien.

» Au contraire, des courts circuits partiels, dans une machine multipolaire, peuvent donner lieu à des surtensions dans l'inducteur, en dehors de toute self-inductance

dans la source d'excitation. Une f. e. m., aussi élevée qu'on voudra, en court circuit n'est pas dangereuse ; au contraire deux f. e. m. égales et contraires dans un circuit, qui ne donnent pas lieu à un courant de circulation, peuvent soumettre les isolants à des tensions pour lesquelles ils ne sont pas prévus ; de même deux f. e. m. inégales et contraires donnent lieu à un courant de circulation résultant de la différence et à une tension entre fils par la masse, qui peut être funeste.

» Par exemple, soit un inducteur comportant quatre bobines en série. Si les quatre bobines sont chacune le siège d'une f. e. m. de 1000 volts, il n'y aura qu'un courant de circulation si les quatre f. e. m. sont de même sens. Si deux des f. e. m. dans deux bobines successives sont de sens contraire à celles des deux autres, il n'y aura pas de courant de circulation, mais une différence de potentiel entre certains fils, par la masse, de 2000 volts. Si trois des f. e. m. dans trois bobines successives sont de sens contraire à la quatrième, il y aura un courant de circulation correspondant à 2000 volts et une différence de potentiel de 1000 volts entre certains fils par la masse, etc.

» Or, ceci peut se produire de plusieurs façons, par des courts circuits partiels dans l'induit ; j'en signalerai au moins deux.

» 1^o Un alternateur diphasé marche en parallèle avec un autre ; un court circuit se déclare dans une bobine d'une phase. Cette bobine devient le siège d'un courant de court circuit, donc en quadrature en retard. Mais pour l'ensemble de la phase considérée, la f. e. m. a diminué ; elle devient le siège d'un courant en quadrature en avance que fournit l'autre alternateur. La machine ne fonctionne plus en polyphasé ; l'inducteur est le siège de deux f. e. m. en $2 \omega t$ produites dans des bobines différentes, et de sens contraire, puisque le courant déwatté est de sens contraire dans des bobines différentes d'une même phase.

» 2^o Un alternateur diphasé fonctionne seul ; deux courts circuits se produisent en même temps, l'un sur une bobine de la phase sinus, l'autre sur une bobine d'un autre pôle de la phase cosinus. Résultat : encore deux f. e. m. en $2 \omega t$ sont développées dans deux bobines différentes de l'inducteur, et elles sont de sens contraire. En effet, si les deux bobines en court circuit étaient sur le même pôle, la somme des deux f. e. m. en $2 \omega t$ serait nulle ; elles sont donc bien de sens contraire.

» On trouverait probablement encore d'autres cas possibles en cherchant bien.

» Et il ne faudrait pas croire que les f. e. m. ainsi développées dans l'inducteur par un court circuit partiel soient petites : on calcule aisément qu'elles atteignent plusieurs milliers de volts dans un turbo-alternateur.

CONCLUSION.

» La variété des accidents qui peuvent se produire avec les turbo-alternateurs est aussi grande que les conséquences en sont désastreuses. Le plus souvent il s'en produit plusieurs simultanément ou successivement.

» Généralement, cela commence par un court circuit en ligne sur une phase,

qui produit des détériorations par surtensions dans la phase ouverte ou dans l'inducteur, ou par déformation des connexions latérales des enroulements. Lorsque la tension remonte, les parties abîmées cèdent et provoquent de nouveaux courts circuits totaux ou partiels qui produisent de nouvelles détériorations. Et le combat cesse faute de combattants !

» Il est certain que l'impression d'insécurité des turbo-alternateurs fut grande il y a deux ou trois ans, et qu'elle n'est pas encore effacée. Le président du Conseil d'administration d'une grande société d'exploitation française, qui possède un assez grand nombre de turbo-alternateurs, ne disait-il pas à ce moment, devant une société technique nombreuse, que pour être certain d'avoir un turbo-alternateur en service il fallait en acheter trois ?

» Heureusement, cette impression d'insécurité s'efface tous les jours et les accidents se font de plus en plus rares. Par l'emploi de procédés spéciaux de fixation des enroulements, par le renforcement des isolants, on est arrivé à obtenir de ces machines qu'elles supportent bien mieux les conséquences des états anormaux passagers des réseaux.

» Je m'excuse de la longueur de cette communication. Je l'ai faite aussi courte qu'il était possible sans laisser dans l'obscurité des choses importantes. Le lecteur qui pourra l'étudier à fond se rendra compte que cette affirmation n'est pas de pure forme.

» Je dois des remerciements, pour l'assistance intelligente et dévouée qu'il m'a prêtée dans l'accomplissement des calculs que comporte cette étude, à mon élève et collaborateur M. P. Noël. »

NOTES ANNEXÉES.

NOTE 1.

« Sur les coefficients d'inductance des deux circuits d'un transformateur, L_1 et L_2 sont les coefficients de self-inductance proprement dits, définis comme si chaque circuit était seul

$$L_1 = n_1 F_1, \quad L_2 = n_2 F_2,$$

n_1 et n_2 étant les nombres de spires, F_1 le flux qu'embrasse le circuit 1 lorsqu'il est seul parcouru par un courant de 10 ampères, F_2 le flux qu'embrasse le circuit 2 lorsqu'il est seul parcouru par un courant de 10 ampères.

» D'autre part, M est défini par

$$M = n_2 k_1 F_1 = n_1 k_2 F_2,$$

$k_1 F_1$ étant la portion du flux F_1 embrassée par le circuit 2 quand le circuit 1 est parcouru par un courant de 10 ampères et $k_2 F_2$ étant la portion du flux F_2 embrassée par le circuit 1 quand le circuit 2 est parcouru par un courant de 10 ampères.

» D'où les self-inductances de fuites :

$$\zeta_1 = L_1 - n_1 k_1 F_1 = L_1 - \frac{n_1}{n_2} M,$$

$$\zeta_2 = L_2 - n_2 k_2 F_2 = L_2 - \frac{n_2}{n_1} M.$$

» Évidemment on a

$$M^2 = (L_1 - \zeta_1)(L_2 - \zeta_2).$$

» Si l'on affecte artificiellement toutes les fuites au circuit 1 en lui attribuant une inductance des fuites totales N_1 , on aura de même

$$M^2 = (L_1 - N_1)L_2,$$

d'où

$$N_1 = L_1 - \frac{M^2}{L_2}.$$

» On peut de même affecter toutes les fuites au circuit 2 en lui attribuant une inductance des fuites totales N_2 :

$$N_2 = L_2 - \frac{M^2}{L_1}.$$

» On sera dans l'un ou dans l'autre de ces cas en alimentant l'un des circuits lorsque l'autre est fermé sur lui-même. Soit par exemple le secondaire en court-circuit, en négligeant les résistances, ce qu'on peut faire pratiquement; on a dans ce circuit

$$L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt} = 0,$$

d'où

$$i_2 = -L_1 \frac{M}{L_2},$$

et, dans le primaire, la f. e. m.

$$e_1 = L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} = \left(L_1 - \frac{M^2}{L_2} \right) \frac{di_1}{dt} = N_1 \frac{di_1}{dt},$$

ce qui veut dire que, quelle que soit la forme du courant, N_1 est l'inductance apparente du primaire.

» J'ai dit que, dans ces conditions, le flux embrassé par le primaire est la somme des flux de fuites des deux circuits, bien entendu pris dans le même sens au même instant. En effet, le flux réel dans le secondaire est nul puisqu'il est supposé sans résistance. Le secondaire reçoit donc du primaire un flux égal et contraire à son flux de fuites; par suite le primaire est le siège d'un flux égal à son flux de fuites

augmenté du flux de fuites secondaires changé de signe (voir *fig. 10*), c'est-à-dire

$$\frac{\mathcal{L}_1 i_1}{n_1} - \frac{\mathcal{L}_2 i_2}{n_2},$$

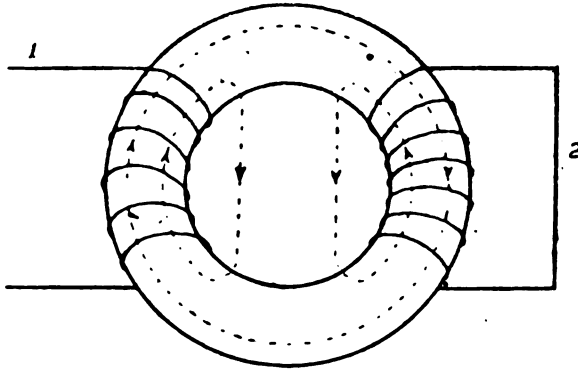


Fig. 10.

soit, en remplaçant $\mathcal{L}_1, \mathcal{L}_2$, par leurs valeurs en fonction de L_1, L_2 et M , et i_2 par sa valeur en fonction de i_1 :

$$\left(L_1 - \frac{n_1}{n_2} M\right) \frac{i_1}{n_1} + \left(L_2 - \frac{n_2}{n_1} M\right) \frac{i_1}{n_2} \frac{M}{L_2} = \left(L_1 - \frac{M^2}{L_2}\right) \frac{i_1}{n_1} = \frac{N_1 i_1}{n_1}.$$

N_1 est bien ainsi l'inductance des fuites totales.

» Il n'est pas inutile de remarquer que

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{L_1}{L_2} = \frac{n_1^2}{n_2^2}.$$

NOTE 2.

» Dans un alternateur diphasé, les trois coefficients d'inductance de l'inducteur conservent la signification qu'ils ont pour l'un des circuits d'un transformateur.

» Soient (*fig. 11*) 1 le circuit inducteur, 2 et 2' les deux circuits induits. Faisons passer 10 ampères dans le circuit 1, il embrasse un flux F_1 tel que

$$L_1 = n_1 F_1.$$

» Une partie $k_1 F_1$ de ce flux traverse l'ensemble des circuits 2 et 2' : la composante $k_1 F_1 \cos \alpha$ traverse le circuit 2 et la composante $k_1 F_1 \sin \alpha$ traverse le circuit 2'. Les mutuelles inductances sont

$$M \cos \alpha \quad \text{entre } 1 \text{ et } 2.$$

$$M \sin \alpha \quad \text{entre } 1 \text{ et } 2';$$

en sorte qu'on a bien encore

$$M = n_2 k_1 F_1$$

et

$$\mathcal{L}_1 = L_1 - n_1 k_1 F_1 = L_1 - \frac{n_1}{n_2} M.$$

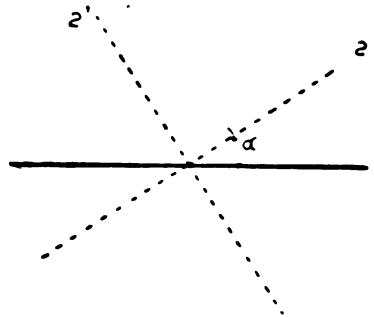


Fig. 11.

» Si l'on ferme les circuits 2 et 2' sur eux-mêmes, en négligeant encore les résistances, on a

$$\frac{d}{dt} (L_2 i_2' + M \cos \alpha i_1) = 0,$$

$$\frac{d}{dt} (L_2 i_2 + M \sin \alpha i_1) = 0,$$

d'où

$$i_2 = -i_1 \frac{M \cos \alpha}{L_2}, \quad i_2' = -i_1 \frac{M \sin \alpha}{L_2}$$

(dans lesquelles α est fonction quelconque du temps).

» D'où la f. e. m. dans le circuit 1 :

$$e_1 = \frac{d}{dt} (L_1 i_1 + M \cos \alpha i_2 + M \sin \alpha i_2'),$$

$$e_1 = \frac{d}{dt} \left(L_1 i_1 - i_1 \frac{M^2 \cos^2 \alpha}{L_2} - i_1 \frac{M^2 \sin^2 \alpha}{L_2} \right),$$

$$e_1 = N_1 \frac{di_1}{dt}.$$

NOTE 3.

» La self-inductance de fuites et l'inductance des fuites totales de l'inducteur d'un alternateur monophasé sont des fonctions périodiques du temps.

» La même figure 11 peut servir en supprimant par la pensée le circuit 2'. Faisons passer 10 ampères dans le circuit 1, il embrasse un flux F_1 tel que

$$L_1 = n_1 F_1.$$

» Quand $\alpha = 0$, une partie $k_1 F_1$ de ce flux traverse 2; quand α est quelconque, une partie $k_1 F_1 \cos \alpha$ de ce flux traverse 2. La self-inductance des fuites est donc

$$L_1 = L_1 - \frac{n_1}{n_2} M \cos \alpha.$$

» Fermons 2 sur lui-même :

$$\frac{d}{dt} (L_2 i_2 + M \cos \alpha i_1) = 0,$$

d'où

$$i_2 = -i_1 \frac{M \cos \alpha}{L_2},$$

et la f. e. m. dans 1 :

$$e_1 = \frac{d}{dt} (L_1 i_1 + i_2 M \cos \alpha),$$

$$e_1 = \frac{d}{dt} \left(L_1 i_1 - i_1 \frac{M^2 \cos^2 \alpha}{L_2} \right),$$

$$e_1 = \frac{d}{dt} \left[\left(L_1 - \frac{M^2 \cos^2 \alpha}{L_2} \right) i_1 \right].$$

» L'inductance des fuites totales est donc

$$N_1 = L_1 - \frac{M^2 \cos^2 \alpha}{L_2};$$

α étant fonction du temps, L_1 et N_1 sont fonctions du temps.

NOTE 4.

» État variable qui suit le court circuit brusque sur les deux phases d'un alternateur diphasé sans amortisseur.

» Le flux dans l'inducteur passe de la valeur constante F_1 à la valeur constante F_{1cc} , par une exponentielle, simple si l'on néglige le $R_1 i_1$ du circuit inducteur, dentelée si l'on en tient compte; nous n'en tiendrons pas compte.

» De même, dans un des circuits de l'induit, il passe, de la valeur qu'il a au moment de la fermeture, à zéro, de la même manière. Les exposants des exponentielles ne sont pas les mêmes pour l'inducteur et l'induit.

» Nous appellerons :

m_{12} et m'_{12} , les coefficients de mutuelle inductance entre l'inducteur et chacun des circuits de l'induit;

i_1 , le courant instantané dans l'inducteur;

i_2 et i'_2 , les courants instantanés dans les circuits d'induit;

L_1 et L_2 , les self-inductances de l'inducteur et de l'induit;

F_2 et F'_2 , les valeurs des flux dans chaque circuit d'induit, au moment de la fermeture (pour $t = 0$).

» Nous aurons ainsi ⁽¹⁾.

$$\begin{aligned} m_{12} i_1 + L_2 i_2 &= F_2 \varepsilon^{-\alpha_1 t}, \\ m_{12} i_1 + L_2 i_2' &= F_2' \varepsilon^{-\alpha_1 t}, \\ m_{12} i_2 + m_{12} i_2' + L_1 i_1 &= F_{1cc} + (F_1 - F_{1cc}) \varepsilon^{-\alpha_1 t}. \end{aligned}$$

» Tirons i_2 et i_2' des deux premières équations et remplaçons dans le troisième. En remarquant que $m_{12}^2 + m_{12}'^2 = M^2$ et que $L_1 - \frac{M^2}{L_2} = N_1$, il vient

$$i_1 = \frac{1}{N_1} \left[F_{1cc} + (F_1 - F_{1cc}) \varepsilon^{-\alpha_1 t} - \frac{1}{L_2} (m_{12} F_2 + m_{12}' F_2') \varepsilon^{-\alpha_1 t} \right].$$

» En écrivant que

$$\int_0^\infty (i_1 - J) dt = \frac{F_1 - F_{1cc}}{R_1},$$

on déduit immédiatement

$$\alpha_1 = \frac{R_1}{N_1}.$$

» Pour pouvoir faire varier les conditions initiales du court circuit, nous ferons toujours celui-ci à l'époque $t=0$, mais nous donnerons aux mutuelles inductances les formes

$$m_{12} = M \cos \omega(t + \tau); \quad m_{12}' = -M \sin \omega(t + \tau);$$

dans lesquelles nous pourrions donner à τ telle valeur que nous voudrions. Il en résulte

$$F_2 = MJ \cos \omega \tau, \quad F_2' = -MJ \sin \omega \tau$$

et

$$m_{12} F_2 + m_{12}' F_2' = M^2 J \cos \omega t.$$

i_2 et i_2' peuvent être exprimés en fonction de i_1 .

» En écrivant que

$$\int_0^\infty i_2 dt = \frac{F_2}{R_2},$$

ou que

$$\int_0^\infty i_2' dt = \frac{F_2'}{R_2},$$

on trouve de même

$$\alpha_2 = \frac{R_2}{2N_2} \frac{L_2 + N_2}{L_2},$$

expression plus compliquée que celle de α_1 , parce que l'inducteur n'est pas polyphasé.

(1) Les circuits sont tous ramenés à une spire pour simplifier.

» Finalement peuvent être exprimés i_1 , i_2 et i'_2 , en remplaçant F_1 et F_{1cc}

$$i_1 = J \left[1 + \frac{L_1 - N_1}{N_1} \varepsilon^{-\frac{R_1}{N_1} t} - \frac{L_1 - N_1}{N_1} \varepsilon^{-\frac{R_1}{2N_1} \frac{L_2 + N_2}{L_2}} \cos \omega t \right];$$

cette expression ne contenant pas τ , la forme du courant inducteur est indépendante de l'époque à laquelle est fait le court circuit

$$i_2 = -\frac{MJ}{L_2} \left[\cos \omega(t + \tau) + \frac{L_1 - N_1}{N_1} \varepsilon^{-\frac{R_1}{N_1} t} \cos \omega(t + \tau) - \frac{1}{2} \frac{L_1 + N_1}{N_1} \varepsilon^{-\frac{R_1}{2N_1} \frac{L_2 + N_2}{L_2}} \cos \omega \tau - \frac{1}{2} \frac{L_1 - N_1}{N_1} \varepsilon^{-\frac{R_1}{2N_1} \frac{L_2 + N_2}{L_2}} \cos \omega(2t + \tau) \right]$$

et une formule analogue pour i'_2 , mais en sinus.

» On peut en outre retenir de ces formules que, lorsque les deux parties d'une machine ne sont pas constituées toutes deux en systèmes polyphasés, la constante de temps est de la forme $\frac{R}{N}$ pour le circuit de la partie non polyphasée, et de la forme

$$\frac{R}{2N} \frac{L + N}{L},$$

ou sensiblement $\frac{R}{2N}$, pour les circuits de la partie polyphasée.

NOTE 5.

» État variable qui suit le court circuit brusque sur les deux phases d'un alternateur diphasé avec amortisseur.

» Mêmes symboles qu'à la Note n° 4, avec en plus : i_1 courant instantané dans l'amortisseur; $m_{1,2}$ et $m_{1,2}'$; mutuelles inductances entre l'amortisseur et les circuits d'induit, que nous poserons

$$m_{1,2} = M \sin \omega(t + \tau), \quad m_{1,2}' = M \cos \omega(t + \tau).$$

» Les valeurs des quatre flux sont :

$$m_{1,2} i_1 + m_{1,2}' i_1' + L_2 i_2 = F_2 \varepsilon^{-a_2 t},$$

$$m_{1,2}' i_1 + m_{1,2} i_1' + L_2 i_2' = F_2' \varepsilon^{-a_2 t},$$

$$m_{1,2} i_2 + m_{1,2}' i_2' + L_1 i_1 = F_{1cc} + (F_1 - F_{1cc}) \varepsilon^{-a_1 t},$$

$$m_{1,2}' i_2 + m_{1,2} i_2' + L_1 i_1' = 0;$$

la dernière équation se rapporte à l'amortisseur.

» Tirons i_2 et i_2' des deux premières équations et remplaçons dans les deux

autres, il vient

$$\begin{aligned} i_1 &= \frac{1}{N_1} \left[F_{1cc} + (F_1 - F_{1cc}) \varepsilon^{-\alpha_1 t} - \frac{1}{L_2} (m_{12} F_2 + m_{12}' F_2') \varepsilon^{-\alpha_1 t} \right], \\ i_1' &= - \frac{1}{L_2 N_1} (m_{12} F_2 + m_{12}' F_2') \varepsilon^{-\alpha_1 t}, \\ i_2 &= \frac{1}{L_2} \left\{ F_2 \varepsilon^{-\alpha_2 t} - \frac{1}{N_1} \left[m_{12} F_{1cc} + (F_1 - F_{1cc}) m_{12} \varepsilon^{-\alpha_1 t} - \frac{M_2}{L_2} F_2 \varepsilon^{-\alpha_1 t} \right] \right\}, \\ i_2' &= \frac{1}{L_2} \left\{ F_2' \varepsilon^{-\alpha_2 t} - \frac{1}{N_1} \left[m_{12}' F_{1cc} + (F_1 - F_{1cc}) m_{12}' \varepsilon^{-\alpha_1 t} - \frac{M_2}{L_2} F_2' \varepsilon^{-\alpha_1 t} \right] \right\}. \end{aligned}$$

» En écrivant que

$$\int_0^\infty (i_1 - J) dt = \frac{F_1 - F_{1cc}}{R_1},$$

on trouve $\alpha_1 = \frac{R_1}{N_1}$, comme dans le cas précédent.

» Et en écrivant soit

$$\int_0^\infty i_2 dt = \frac{MJ \cos \omega \tau}{R_2},$$

soit

$$\int_0^\infty i_2' dt = \frac{MJ \sin \omega \tau}{R_2},$$

on trouve cette fois $\alpha_2 = \frac{R_2}{N_2}$ (inducteur polyphasé) ; et finalement, en remplaçant les F ,

$$\begin{aligned} i_1 &= J \left(1 + \frac{L_1 - N_1}{N_1} \varepsilon^{-\frac{R_1}{N_1} t} - \frac{L_1 - N_1}{N_1} \varepsilon^{-\frac{R_1}{N_1} t} \cos \omega t \right), \\ i_1' &= -J \frac{L_1 - N_1}{N_1} \varepsilon^{-\frac{R_1}{N_1} t} \sin \omega t \end{aligned}$$

(expressions indépendantes de l'époque de fermeture),

$$i_2 = - \frac{MJ}{L_2} \left[\cos \omega(t + \tau) + \frac{L_1 - N_1}{N_1} \varepsilon^{-\frac{R_1}{N_1} t} \cos \omega(t + \tau) - \frac{L_1}{N_1} \varepsilon^{-\frac{R_1}{N_1} t} \cos \omega \tau \right]$$

et une formule analogue pour i_2' , mais en sinus.

» Ainsi que je l'ai dit au début de la Note 4, les flux ne sont pas en réalité aussi simples et comprennent encore une ondulation correspondant à la production de la chute ohmique dans chaque circuit ; mais si l'on veut tenir compte de ces faits, les calculs se compliquent beaucoup. Nous avons traité ces deux problèmes complètement : l'introduction des résistances a pour effet d'ajouter aux formules un certain nombre de termes, dont l'importance est trop secondaire pour qu'on allonge encore ce Mémoire.

NOTE 6.

» On se propose de trouver, pour un alternateur diphasé sans circuit amortisseur, dont une des phases est en court circuit, les formes approchées : du courant inducteur, du courant de court circuit et de la f. e. m. dans la phase restée ouverte, en régime permanent.

i_1 est le courant inducteur instantané,

i_2 le courant de court circuit instantané,

m_{12} la mutuelle inductance entre l'inducteur et la phase court circuitée,

m'_{12} la mutuelle inductance entre l'inducteur et la phase ouverte.

» La résistance de l'induit étant supposée nulle, le flux ψ est constamment nul; on a donc

$$m_{12}i_1 + L_2i_2 = 0.$$

» Pour la même raison, le flux dans l'inducteur F_{1cc} est constant, d'où

$$m_{12}i_2 + L_1i_1 = F_{1cc}. \quad (1).$$

» De ces deux équations

$$i_1 = \frac{L_2F_{1cc}}{L_1L_2 - m_{12}^2},$$

$$i_2 = -\frac{m_{12}F_{1cc}}{L_1L_2 - m_{12}^2},$$

et la tension dans la phase ouverte

$$e'_2 = -\frac{d}{dt}(m'_{12}i_1) = -L_2F_{1cc}\frac{d}{dt}\left(\frac{m'_{12}}{L_1L_2 - m_{12}^2}\right).$$

» La partie constante J du courant inducteur est

$$J = \frac{1}{T} \int_0^T i_1 dt = \frac{L_2F_{1cc}}{T} \int_0^T \frac{dt}{L_1L_2 - m_{12}^2}.$$

» En posant, par exemple,

$$m_{12} = M \cos \omega t,$$

$$m'_{12} = -M \sin \omega t,$$

J devient, après intégration,

$$J = \frac{L_2F_{1cc}}{\sqrt{(L_1L_2 - M^2)}L_1L_2} = \frac{F_{1cc}}{\sqrt{L_1\left(L_1 - \frac{M^2}{L_2}\right)}} = \frac{F_{1cc}}{\sqrt{L_1N_1}},$$

(1) Inducteur et induit sont supposés d'une spire seulement pour simplifier.

ce qui nous donne la relation entre le flux constant dans l'inducteur et le courant continu d'excitation J ,

$$F_{\text{exc}} = J \sqrt{L_1 N_1},$$

qui permet d'exprimer i_1 , i_2 et e'_2 en fonction de J ,

$$i_1 = \frac{J L_2 \sqrt{L_1 N_1}}{L_1 L_2 - M^2 \cos^2 \omega t} = J \frac{\sqrt{L_1 N_1}}{L_1 - (L_1 - N_1) \cos^2 \omega t},$$

$$i_2 = - \frac{J \sqrt{L_1 N_1} M \cos \omega t}{L_1 L_2 - M^2 \cos^2 \omega t} = - \frac{M}{L_2} J \frac{\sqrt{L_1 N_1} \cos \omega t}{L_1 - (L_1 - N_1) \cos^2 \omega t},$$

$$\begin{aligned} e'_2 &= + J L_2 \sqrt{L_1 N_1} \frac{d}{dt} \left(\frac{M \sin \omega t}{L_1 L_2 - M^2 \cos^2 \omega t} \right) \\ &= - \omega M J \sqrt{\frac{L_1}{N_1}} \frac{\frac{L_1 - N_1}{N_1} \sin^2 \omega t - 1}{\left(\frac{L_1 - N_1}{N_1} \sin^2 \omega t + 1 \right)^2} \cos \omega t, \end{aligned}$$

ainsi que cette même force électromotrice $(e'_2)_0$, quand l'alternateur est à vide,

$$(e'_2)_0 = \omega M J \cos \omega t.$$

» La figure 4 montre les courbes de ces quatre grandeurs pour le cas particulier où $M_2 = 0.8 L_1 L_2$, ce qui correspond à des fuites moyennes. ($N_1 = 0.2 L_1$).

» Et ci-dessous certaines valeurs particulières :

$$(i_1)_{\text{max.}} = J \sqrt{\frac{L_1}{N_1}},$$

$$(i_1)_{\text{min.}} = J \sqrt{\frac{N_1}{L_1}},$$

$$I_{1 \text{ eff.}} = J \sqrt{\frac{L_1 + N_1}{2 \sqrt{L_1 N_1}}}, \quad \text{approximativement} \quad \frac{J}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{L_1}{N_1}},$$

$$(i_2)_{\text{max.}} = J \sqrt{\frac{L_1}{N_1}} \frac{M}{L_2},$$

$$I_{2 \text{ eff.}} = \frac{M J}{\sqrt{2} L_2} \sqrt{\frac{L_1}{N_1}} = I_{\text{exc}} \sqrt{\frac{L_1}{N_1}},$$

$$(e'_2)_{\text{max.}} = \omega M J \sqrt{\frac{L_1}{N_1}},$$

$$E_{2 \text{ eff.}} = \frac{\omega M J}{2} \sqrt{\frac{L_1^2 + N_1^2}{L_1 \sqrt{L_1 N_1}}}, \quad \text{approximativement} \quad \frac{\omega M J}{2} \sqrt{\frac{L_1}{N_1}},$$

$$(E'_1)_{0 \text{ eff.}} = \frac{\omega M J}{\sqrt{2}}.$$

» D'où ces quelques conclusions :

» Le courant de court circuit efficace est toujours plus grand que celui déduit en première approximation I_{cc} ; de une fois et demie à deux fois.

» Le maximum de la tension dans la phase ouverte est toujours plus grand que le maximum à vide.

» La tension efficace dans la phase ouverte peut être, selon les fuites, plus grande ou plus petite que la tension efficace à vide : pour environ $N_1 < \frac{L_1}{4}$ elle est plus grande; pour $N > \frac{L_2}{4}$ elle est plus petite.

» Pour fixer les idées, si $\frac{L_1}{N_1} = 10$, la tension maximum dans la phase ouverte est trois fois la tension maximum à vide, la tension efficace est 1,25 fois la tension efficace à vide.

NOTE 7.

» On se propose de trouver, pour un alternateur diphasé avec circuit amortisseur, dont une des phases est en court circuit, les formes approchées : du courant inducteur, du courant dans l'amortisseur, du courant de court circuit et de la f. e. m. dans la phase restée ouverte, *en régime permanent*.

» En plus des symboles du cas précédent nous aurons :

i_1 , courant instantané dans l'amortisseur;

$m'_{12} = M \sin \omega t$, mutuelle inductance entre l'amortisseur et la phase en court circuit ;

$m_{12} = M \cos \omega t$, mutuelle inductance entre l'amortisseur et la phase ouverte.

» Comme précédemment, nous avons pour la phase en court circuit

$$m_{12} i_1 + m_{12} i'_1 + L_2 i_2 = 0.$$

» Dans l'amortisseur

$$m_{12} i_2 + L_1 i'_1 = 0.$$

» Dans l'inducteur

$$m_{12} i_2 + L_1 i_1 = F_{1cc}.$$

» Tirant i'_1 de la deuxième équation, on le substitue dans la première, dont on tire i_2 qu'on substitue dans la troisième, dont on tire i_1 ,

$$i_1 = \frac{F_{1cc}}{L_1} \frac{L_1 L_2 - m_{12}^2}{L_1 L_2 - m_{12}^2 - m_{12}^2} = \frac{F_{1cc}}{L_1} \frac{L_1 L_2 - m_{12}^2}{L_1 L_2 - M^2}.$$

» Puis de nouveau i_2

$$i_2 = - \frac{F_{1cc}}{L_1 L_2 - M^2} m_{12}$$

et i'_1

$$i'_1 = \frac{F_{1cc}}{L_1} \frac{m_{12} m_{12}}{L_1 L_2 - M^2}.$$

» On peut remarquer de suite que ces expressions ne contiennent, chacune, qu'un terme sinusoïdal, ainsi que la tension dans la phase ouverte

$$e'_2 = - \frac{d}{dt} (m_{12} i_1 + m_{12} i'_1) = \frac{\omega M F_{1cc}}{L_1} \cos \omega t.$$

» La partie constante J du courant inducteur est

$$J = \frac{1}{T} \int_0^T i_1 dt = \frac{F_{1cc}}{L_1 L_2 (L_1 L_2 - M^2)} \int_0^T (L_1 L_2 - m_{12}^2) dt,$$

$$J = \frac{F_{1cc}}{2 L_1} \frac{2 L_1 L_2 - M^2}{L_1 L_2 - M^2} = \frac{F_{1cc}}{2 L_1} \frac{L_1 + N_1}{N_1},$$

ce qui permet de remplacer F_{1cc} par J dans les formules

$$i_1 = J \left(1 + \frac{L_1 - N_1}{L_1 + N_1} \cos 2 \omega t \right),$$

$$i_2 = - \frac{2 M J}{L_2 + N_2} \cos \omega t,$$

$$i'_1 = J \frac{L_1 - N_1}{L_1 + N_1} \sin 2 \omega t,$$

$$e'_2 = 2 \omega M J \frac{N_1}{L_1 + N_1} \cos \omega t.$$

» Cette f. e. m., quand l'alternateur est à vide, est

$$(e'_2)_0 = \omega M J \cos \omega t.$$

» Pour qu'on puisse comparer avec le cas de l'alternateur sans amortisseur, nous avons porté en figure 5 les courbes de ces cinq grandeurs pour le cas particulier où $M^2 = 0,8 L_1 L_2$, fuites moyennes ($N_1 = 0,2 L_1$).

» Ci-après, quelques valeurs particulières :

$$(i_1)_{\max.} = J \frac{2 L_1}{L_1 + N_1},$$

$$(i_1)_{\min.} = J \frac{2 N_1}{L_1 + N_1},$$

$$I_1 (\text{eff.}) = J \sqrt{1 + \frac{1}{2} \frac{(L_1 - N_1)^2}{(L_1 + N_1)^2}},$$

$$I_1 (\text{eff.}) = \frac{J}{\sqrt{2}} \frac{L_1 + N_1}{L_1 + N_1},$$

$$(i_2)_{\max.} = \frac{2 M J}{L_2 + N_2},$$

$$I_2 (\text{eff.}) = \frac{\sqrt{2} M J}{L_2 + N_2}.$$

approximativement $2I_{2cc}$;

$$(e'_2)_{\max.} = 2\omega MJ \frac{N_1}{L_1 + N_1},$$

$$E'_1(\text{eff.}) = \sqrt{2}\omega MJ \frac{N_1}{L_1 + N_1},$$

$$(E'_2)_0(\text{eff.}) = \frac{\omega MJ}{\sqrt{2}}.$$

» D'où ces quelques conclusions :

» Le courant de court circuit efficace est environ deux fois celui de première approximation I_{2cc} ;

» Les valeurs maxima et efficace de la tension dans la phase ouverte sont toujours plus petites qu'à vide et d'autant plus petites que les fuites sont plus faibles, contrairement à ce qu'indique le calcul sans amortisseur.

» Pour fixer les idées, si $\frac{L_1}{N_1} = 20$, les tensions maxima et efficace dans la phase ouverte ne valent que 0,18 des tensions maxima et efficace à vide.

NOTE 8.

» État variable qui suit le court circuit brusque sur une phase d'un alternateur diphasé sans amortisseur.

» Les symboles sont les mêmes que dans la Note 4. Il n'y a que deux circuits fermés ⁽¹⁾

$$m_{12}i_2 + L_1i_1 = F_{1cc} + (F_1 - F_{1cc})\varepsilon^{-a_1t},$$

$$m_{12}i_1 + L_2i_2 = F_2\varepsilon^{-a_2t}.$$

» Tirons i_2 de la seconde équation et remplaçons dans la première, il vient

$$i_1 = \frac{1}{L_1 - \frac{m_{12}^2}{L_2}} \left[F_{1cc} + (F_1 - F_{1cc})\varepsilon^{-a_1t} - \frac{m_{12}}{L_2} F_2 \varepsilon^{a_2t} \right].$$

» Il faut encore chercher la quantité d'électricité correspondant à ce courant diminué de J . C'est plus complexe que dans les cas précédents. Pour faire varier les conditions initiales, nous poserons

$$m_{12} = M \cos \omega(t + \tau).$$

(¹) Les circuits sont toujours supposés d'une spire pour simplifier.

» Développons le quotient en avant de la parenthèse de i_1 .

$$\begin{aligned} \frac{1}{L_1 - \frac{m_{12}^2}{L_2}} &= \frac{L_2}{L_1 L_2 - \frac{M^2}{2} - \frac{M^2}{2} \cos 2\omega(t + \tau)} \\ &= \frac{L_2}{L_1 L_2 - \frac{M^2}{2}} \left[1 + \frac{M^2}{2 L_1 L_2 - M^2} \cos 2\omega(t + \tau) \right. \\ &\quad \left. + \left(\frac{M^2}{2 L_1 L_2 - M^2} \right)^2 \cos^2 \omega(t + \tau) + \dots \right]. \end{aligned}$$

» Remarquons alors que, puisque le développement ne contient pas de termes en $\cos \omega(t + \tau)$, le terme qui contient m_{12} dans la parenthèse de i_1 ne donnera pas de quantité d'électricité, et que finalement la partie constante seule de ce développement donnera un résultat dans l'intégration de la quantité d'électricité.

» Or la partie constante de ce développement est une série convergente.

» En effet,

$$\frac{M^2}{2 L_1 L_2 - M^2} = \frac{\frac{M^2}{L_2}}{2 L_1 - \frac{M^2}{L_2}} = \frac{L_1 - N_1}{L_1 + N_1},$$

quantité plus petite que l'unité.

» La partie constante du développement est

$$\frac{2}{L_1 + N_1} \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{L_1 - N_1}{L_1 + N_1} \right)^2 + \frac{3}{8} \left(\frac{L_1 - N_1}{L_1 + N_1} \right)^4 + \frac{5}{16} \left(\frac{L_1 - N_1}{L_1 + N_1} \right)^6 + \dots \right]$$

(les puissances paires du cosinus donnent seules quelque chose).

» La parenthèse est justement le développement de

$$\frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{L_1 - N_1}{L_1 + N_1} \right)^2}} = \frac{L_1 + N_1}{2 \sqrt{L_1 N_1}},$$

en sorte que, dans l'intégration de $i_1 dt$, la partie

$$\frac{1}{\sqrt{L_1 N_1}} [F_{1cc} + (F_1 - F_{1cc}) e^{-a_1 t}]$$

donnera seule un résultat.

» En écrivant

$$\int_0^\infty (i_1 - J) dt = \frac{F_1 - F_{1cc}}{R_1},$$

on a finalement

$$a_1 = \frac{R_1}{\sqrt{L_1 N_1}}.$$

» On fera de même pour i_2

$$i_2 = \frac{F_2}{L_2} \varepsilon^{-a_2 t} - m_{12} \frac{F_{1cc} + (F_1 - F_{1cc}) \varepsilon^{-a_1 t} - \frac{m_{12}}{L_2} F_2 \varepsilon^{-a_2 t}}{L_1 L_2 + m_{12}^2}.$$

» Dans l'intégration de la quantité d'électricité, seuls les termes en F_2 donneront quelque chose, de sorte que la partie

$$\frac{F_2}{L_2} \varepsilon^{-a_2 t} + \frac{m_{12}^2}{L_2 (L_1 L_2 - m_{12}^2)} F_2 \varepsilon^{-a_2 t} = \frac{F_2 L_1 \varepsilon^{-a_2 t}}{L_1 L_2 - m_{12}^2}$$

est seule à considérer. Comme précédemment, elle deviendra, après développement,

$$\frac{1}{\sqrt{L_2 N_2}} F_2 \varepsilon^{-a_2 t}.$$

» En écrivant

$$\int_0^\infty i_2 dt = \frac{F_2}{R_2},$$

on aura finalement

$$a_2 = \frac{R_2}{\sqrt{L_2 N_2}}.$$

» Les valeurs définitives de i_1 et i_2 deviennent ainsi, en remplaçant les flux (F_1 et F_{1cc} par leurs valeurs connues; F_2 par $MJ \cos \omega t$),

$$i_1 = \frac{J}{L_1 - (L_1 - N_1) \cos^2 \omega(t + \tau)} \times \left[\sqrt{L_1 N_1} + (L_1 - \sqrt{L_1 N_1}) \varepsilon^{-\frac{R_1}{\sqrt{L_1 N_1}} t} - (L_1 - N_1) \cos \omega \tau \varepsilon^{-\frac{R_2}{\sqrt{L_2 N_2}} t} \cos \omega(t + \tau) \right],$$

$$i_2 = \frac{M}{L_2} J \left\{ \cos \omega \tau \varepsilon^{-\frac{R_2}{\sqrt{L_2 N_2}} t} - \frac{\cos \omega(t + \tau)}{L_1 - (L_1 - N_1) \cos^2 \omega(t + \tau)} \left[\begin{array}{c} \text{même} \\ \text{parenthèse} \\ \text{que pour } i_1 \end{array} \right] \right\}.$$

» La tension dans la phase restée ouverte est de forme très compliquée; j'entends par là sa valeur instantanée

$$e'_2 = - \frac{d}{dt} (m_{12} i_1),$$

et je ne l'ai pas calculée. Mais on peut avoir le maximum de cette tension dans deux cas, assez simplement :

» Pour $\cos \omega \tau = 0$ (pas de courant continu induit dans l'induit),

$$(e'_2)_{\max.} = \omega MJ \frac{L_1}{N_1}.$$

» Pour $\cos \omega \tau = +1$ (maximum de courant continu dans l'induit),

$$(e'_2)_{\max.} = MJ \frac{2L_1 - N_1}{N_1}.$$

Elle est toujours plus grande que la tension à vide; elle pourrait même être considérablement plus grande (10 à 20 fois), si la saturation magnétique ne venait tempérer ces résultats.

NOTE 9.

» État variable qui suit le court circuit brusque sur une phase d'un alternateur diphasé avec circuit amortisseur :

$$m_{12} i_2 + L_1 i_1 = F_{1cc} + (F_1 - F_{1cc}) \varepsilon^{-a_1 t},$$

$$m_{12} i_2 + L_1 i_1' = 0,$$

$$m_{12} i_1 + m_{12} i_1' + L_2 i_2 = F_2 \varepsilon^{-a_2 t}.$$

» La deuxième équation se rapporte à l'amortisseur.

» Tirons i_1 et i_1' des deux premières équations et remplaçons dans la troisième,

$$i_2 = \frac{1}{N_2} \left\{ F_2 \varepsilon^{-a_2 t} - \frac{m_{12}}{L_1} [F_{1cc} + (F_1 - F_{1cc}) \varepsilon^{-a_1 t}] \right\}.$$

» En écrivant

$$\int_0^\infty i_2 dt = \frac{F_2}{R_2},$$

on obtient

$$a_2 = \frac{R_2}{N_2}.$$

» On a de nouveau

$$i_1 = \frac{1}{L_1} \left\{ F_{1cc} + (F_1 - F_{1cc}) \varepsilon^{-a_1 t} - \frac{F_2}{N_2} m_{12} \varepsilon^{-a_2 t} + \frac{m_{12}^2}{L_1 N_2} [F_{1cc} + (F_1 - F_{1cc}) \varepsilon^{-a_1 t}] \right\}.$$

» En écrivant

$$\int_0^\infty (i_1 - J) dt = \frac{F_1 - F_{1cc}}{R_1},$$

on obtient

$$a_1 = \frac{R_1}{2N_1} \frac{L_1 + N_1}{L_1}.$$

» On voit ici s'appliquer la remarque que nous avons faite au sujet des constantes du temps, quand nous traitons le cas de l'alternateur en court circuit diphasé sans amortisseur : la constante est de la forme $\frac{R}{N}$ pour le circuit de la partie non polyphasée, et de la forme

$$\frac{R}{2N} \frac{L + N}{L},$$

ou sensiblement $\frac{2N}{R}$ pour les circuits de la partie polyphasée.

» Finalement :

$$i_1 = J \left[1 + \frac{L_1 - N_1}{2N_1} \varepsilon^{-\frac{R_1}{2N_1} \frac{L_1 + N_1}{L_1} t} - \frac{L_1 - N_1}{N_1} \cos \omega \tau \varepsilon^{-\frac{R_1}{N_1} t} \cos \omega(t + \tau) \right. \\ \left. + \frac{L_1 - N_1}{L_1 + N_1} \cos 2\omega(t + \tau) + \frac{1}{2} \frac{(L_1 - N_1)^2}{(L_1 + N_1)N_1} \varepsilon^{-\frac{R_1}{2N_1} \frac{L_1 + N_1}{L_1} t} \cos 2\omega(t + \tau) \right] \\ i'_1 = 2 \left[\frac{L_1 - N_1}{L_1 - N_1} \sin 2\omega(t + \tau) - \frac{L_1 - N_1}{N_1} \cos \omega \tau \varepsilon^{-\frac{R_1}{N_1} t} \sin \omega(t + \tau) \right. \\ \left. + \frac{1}{2} \frac{(L_1 - N_1)^2}{(L_1 + N_1)N_1} \varepsilon^{-\frac{R_1}{2N_1} \frac{L_1 + N_1}{L_1} t} \sin 2\omega(t + \tau) \right], \\ i_2 = MJ \left[-\frac{2}{L_2 + N_2} \cos \omega(t + \tau) + \frac{1}{N_2} \varepsilon^{-\frac{R_2}{N_2} t} \cos \omega \tau \right. \\ \left. - \frac{L_2 - N_2}{(L_2 + N_2)N_2} \varepsilon^{-\frac{R_2}{2N_2} \frac{L_2 + N_2}{L_2} t} \cos \omega(t + \tau) \right].$$

» La tension dans la phase restée ouverte se déduit facilement

$$e'_2 = -\frac{d}{dt}(m_{12}i_1 + m_{1'2}i'_1);$$

après opération (1),

$$e'_2 = \frac{\omega MJ}{L_1 + N_1} \left[2N_1 + (L_1 - N_1) \varepsilon^{-\frac{R_1}{2N_1} \frac{L_1 + N_1}{L_1} t} \right] \cos \omega(t + \tau);$$

elle reste toujours inférieure à la tension à vide, puisque la parenthèse est toujours plus petite que $(L_1 + N_1)$. On voit quelle énorme importance a l'amortisseur à ce point de vue. »

M. le PRÉSIDENT félicite très vivement M. Boucherot pour sa très remarquable étude qui jette une clarté nouvelle sur des phénomènes jusqu'ici obscurs.

La séance est levée à 10 h 20 m du soir.

(1) En négligeant un petit terme en sinus.

BIBLIOGRAPHIE.

La théorie corpusculaire de l'électricité. Les électrons et les ions, par P. DRUMAUX, avec une Préface d'Éric GÉRARD; 1 volume. Paris, Gauthier-Villars; 1911.

Il n'est plus permis aujourd'hui aux ingénieurs électriciens d'ignorer les théories modernes de l'électricité qui permettent d'expliquer bien des phénomènes intéressant la technique industrielle.

A ceux qui voudraient entreprendre l'étude de ces théories, nous ne saurions trop recommander la lecture de l'Ouvrage de M. Drumaux. Ce n'est point, en effet, un vulgaire Ouvrage de vulgarisation, mais un résumé très bien fait des principaux travaux, aussi bien théoriques qu'expérimentaux, qui ont amené les physiciens à la conception actuelle des ions et des électrons.

Après avoir rappelé les expériences qui ont conduit à envisager les corpuscules chargés auxquels on a donné le nom d'*électrons*, l'auteur, sans entrer naturellement dans aucun développement mathématique, nous fait connaître quelles équations Lorentz a dû substituer à celles de Maxwell pour tenir compte de la présence des électrons dans les diélectriques, les conséquences qu'on tire de ces équations et comment Max Abraham et d'autres physiciens ont été amenés à créer une dynamique nouvelle pour l'électron.

Pour permettre à ceux qui voudraient rechercher dans les textes originaux la démonstration mathématique des propriétés qu'il se borne à énoncer, M. Drumaux, dans un Appendice ajouté à son Ouvrage, a rassemblé les principes du calcul vectoriel, si utilisé aujourd'hui par les physiciens.

Précis de Télégraphie sans fil. Complément de l'Ouvrage : Les oscillations électriques et la Télégraphie sans fil, par J. ZENNECK. Traduit de l'allemand par MM. BLANCHIN, GUÉNARD et PICOT. Paris, Gauthier-Villars; 1911.

Après avoir rappelé les bases théoriques de la Télégraphie sans fil, l'auteur étudie les diverses questions qui se rapportent à l'installation des appareils émetteurs et récepteurs.

Dans cet Ouvrage ne sauraient évidemment trouver place les longs développements mathématiques auxquels ont dû se livrer Drude, Bjerknes, etc., pour rendre compte des phénomènes qui se produisent dans les circuits parcourus par les oscillations électriques; mais, si les calculs n'y sont pas, on trouve très nettement mis en évidence les résultats auxquels ils conduisent, avec l'indication très précise des hypothèses simplificatrices qui ont dû être faites pour arriver aux formules indiquées, hypothèses qu'il est nécessaire de ne jamais oublier quand on est amené à appliquer les formules.

Bref, ce Livre nous semble devoir être le vade-mecum de tous ceux qui s'occupent de télégraphie sans fil.

Principes de la technique de l'éclairage, par le D^r Ing. L. BLOCH, traduit par G. ROY.
(*Bibliothèque de l'Élève-Ingénieur.*) Grenoble, Jules Roy ; Paris, Gauthier-Villars, 1911.
1 vol. in-8, broché.

Les Ouvrages techniques sur l'éclairage sont rares en France et les problèmes rencontrés dans la recherche de la bonne utilisation de la lumière ont été jusqu'ici assez négligés chez nous par les techniciens.

M. Roy a donc fait une œuvre utile en traduisant les *Principes de la technique de l'éclairage*, par Bloch, pour la *Bibliothèque de l'Élève-Ingénieur*, publiée chez Gauthier-Villars.

L'auteur a laissé entièrement de côté l'étude des lampes. Après avoir posé les principes photométriques indispensables, il expose comment on peut calculer un éclairage dans les différents cas de la pratique : espaces découverts, voies publiques, salles diverses. La méthode de mesure des éclairages et les principes de l'éclairage indirect forment les autres parties de son Livre.

On trouve en annexe tous les renseignements utiles pour appliquer les méthodes exposées, tableaux de données numériques et courbes de répartition des principales sources lumineuses électriques ou au gaz.

Il faut dire cependant que les projets d'éclairage sont souvent moins faciles à réaliser que les élèves pourraient le supposer à la lecture de cet Ouvrage, car le juge suprême dans ces questions n'est pas le photomètre, mais l'œil, organe beaucoup plus complexe ; les indications photométriques sont insuffisantes si elles ne sont pas sanctionnées par l'effet produit, c'est-à-dire par l'appréciation de l'œil.

LISTE DES OUVRAGES

OFFERTS A LA SOCIÉTÉ INTERNATIONALE DES ELECTRICIENS.

(Suite.)

La Bibliothèque est ouverte aux Membres de la Société, tous les jours,
de 3 heures à 6 heures, excepté les dimanches et jours de fêtes,
12, rue de Staël.

France.

Atmosphères (Les) des planètes. Conférences faites le 8 mars 1911, par le professeur Dr SVAUTE ARRHENIUS. Paris, A. Hermann et fils, 1911; 1 brochure in-8 (*Publications de la Société de Chimie physique*). (*Don de l'éditeur.*)

Manuel élémentaire de Télégraphie sans fil, par C. TISSOT. Paris, Augustin Challanel, 1912; 1 vol. in-8, broché. (*Don de l'éditeur.*)

Recherches récentes sur le facies des cristaux. Conférence faite le 25 janvier 1911, par M. P. GAUBERT. Paris, A. Hermann et fils, 1911; 1 brochure in-8 (*Publications de la Société de Chimie physique*). (*Don de l'éditeur.*)

Traité complet d'analyse chimique, par J. POST et B. NEUMANN. 2^e édition française entièrement refondue par G. CHENU et M. PELLET. T. III, fasc. 1. Paris, A. Hermann et fils, 1912; 1 vol. in-8. (*Don de l'éditeur.*)

Traité de Physique, par O.-D. CHWOLSON. Ouvrage traduit sur les éditions russe et allemande, par E. DAVAUX. 2^e édition française entièrement refondue et considérablement augmentée par l'auteur, avec des additions et des notes, par E. et F. COSSERAT. T. I, vol. 1 : Introduction, Mécanique, Méthodes et Instruments de mesure. Paris, A. Hermann et fils, 1912; 1 vol. in-8, broché. (*Don de l'éditeur.*)

•

Étranger.

The magnetic Circuit, by V. KARAPETOFF. New-York, M. Graw-Hill Book Cy, 1911; 1 vol. in-8, relié toile. (*Don de l'éditeur.*)

TABLE ALPHABÉTIQUE DES MATIÈRES

CONTENUES DANS LE TOME I (3^e SÉRIE).

Bibliographie.

	Pages
Agenda Dunod pour 1911 : Électricité, par M. J.-A. Montpellier.....	61
Année électrique, électrothérapique et radiographique (L'), par M. le D ^r Foveau de Courmelles.....	360
Annuaire du Bureau des Longitudes pour 1911.....	60
Cours élémentaire d'Électricité industrielle, par M. P. Roberjot.....	62
Distribution d'énergie électrique.....	360
Électricité et ses applications (L'), par M. le D ^r L. Graetz.....	229
Éléments de Calcul vectoriel, par MM. C. Burali Forti et B. Marcolongo.....	170
Encyclopédie électrotechnique, par M. F. Loppé.....	230
Enroulements industriels des machines à courant continu et à courants alternatifs; théorie et pratique (Les), par M. Eug. Marec.....	59
Ferro-magnétisme. Applications industrielles (Le), par M. R. Jouaust.....	397
Force motrice d'atelier. Guide pratique pour le choix et l'installation de la force motrice dans les ateliers, par M. E. Allain-Launay.....	62
Formulaire de l'Électricien et du Mécanicien, par M. J. Roux.....	361
Génératrices de courants et moteurs électriques. Introduction à l'étude de l'Élec- trotechnique appliquée, par M. E. Gutton.....	169
Guide de la pratique électrique, par M. le D ^r G. Briou.....	58
Introduction à l'établissement des lignes aériennes de transports d'énergie élec- trique, par M. O. Cahen.....	61
Leçons sur l'Électricité, par M. Eric Gérard.....	230
Manuel de l'Ingénieur.....	361
Manuel pratique d'Électricité industrielle, par M. Ch. Gruet.....	62
Méthodes et appareils de mesures électriques et magnétiques, par M. A. Ilievici....	58
Moteurs électriques à courant continu et leurs dispositifs de commande, par M. P. Denis.....	361
Notions générales sur la Télégraphie et la Téléphonie sans fil, par M. R. de Val- breuze.....	60
Précis d'Électricité industrielle, par M. A. Goulliart.....	61
Précis de Télégraphie sans fil. Complément de l'Ouvrage : Les oscillations élec- triques et la télégraphie sans fil, par M. Zenneck.....	596
Principes de la technique de l'éclairage, par M. L. Bloch.....	597

	Pages
Recueil de problèmes avec solutions sur l'Électricité et ses applications pratiques, par M. H. Wieveger.....	169
Régulation des groupes électrogènes, par M. L. Barbillion.....	169
Substances isolantes et les méthodes d'isolement utilisées dans l'industrie élec- trique (Les), par M. J. Escard.....	169
Technique de la houille blanche et des transports d'énergie électrique (La), par M. E. Pacoret.....	397
Technique pratique des courants alternatifs (La), par M. G. Sartori.....	170
Technologie électrique, par M. Le Souhaitier.....	229
Théorie corpusculaire de l'Électricité. Les électrons et les ions, par M. P. Drumaux.....	596
Toute la Chimie minérale par l'Électricité, par M. J. Séverin.....	171
Traité de Chimie générale, par M. Nernst.....	171
Traité juridique de l'Industrie électrique, par MM. P. Istel et E. Lemonon.....	360
Turbines à vapeur (Les), par M. F. Cordier.....	229

Communications diverses.

Allocution de M. Bochet.....	225
Allocution de M. Lippmann.....	227
Assemblée générale annuelle du 5 avril 1911.....	173
Bibliographie..... 58, 169, 229, 360, 397,	596
Comité d'Administration (Rapport du).....	178
Comité d'Administration (Renouvellement partiel du).....	223
Commission des Comptes : Rapport de l'Exercice 1910, par M. Cellerier, rappor- teur.....	176
Correspondance..... 115, 166,	228
Dons..... 174, 504,	528
École supérieure d'Électricité (Liste des Élèves diplômés).....	396
Laboratoire central et l'École supérieure d'Électricité (Compte rendu sur le), par M. Janet.....	180
Membres décédés..... 67, 174, 284, 364, 504	528
Membres titulaires (Admission de)..... 6, 66, 122, 174, 234, 284, 364,	504
Ouvrages offerts (Liste des)..... 63, 119, 172, 232, 282, 362, 398, 524,	598
Réunions ordinaires mensuelles du 11 janvier 1911.....	5
Id. du 1 ^{er} février 1911.....	65
Id. du 1 ^{er} mars 1911.....	121
Id. du 5 avril 1911.....	173
Id. du 3 mai 1911.....	233
Id. du 7 juin 1911.....	283
Id. du 5 juillet 1911.....	363
Id. du 8 novembre 1911.....	503
Id. du 6 décembre 1911.....	527
Situation financière et bilan.....	190
Table alphabétique des Auteurs.....	603
Table alphabétique des Matières.....	599

Communications techniques.

	Pages
Coefficients d'inductance (Sur les), par M. Boucherot.....	211
Commutation dans les dynamos à courant continu (Sur la), par M. Swyngedaauw....	523
Compréhension de l'effet de peau (Sur la), par M. Girault.....	543
Compréhension de l'effet de peau (Observations sur la), par M. Bunet.....	554
Compte rendu au nom de la 1 ^{re} Section de l'étude relative aux phénomènes électromagnétiques dus à la mise en court circuit des machines, étude présentée par M. Boucherot au Congrès de Turin, par M. Brunswick.....	555
Compte rendu sommaire de l'excursion faite dans le sud de la France, par M. de Valbreuze.....	399
Compteurs électrolytiques (Les), par M. Hatfield.....	99
Congrès international des Applications électriques, Turin 1911.....	115
Courts circuits d'alternateurs (A propos des), par M. Boucherot.....	285
Éclairage au Néon (L'), par M. G. Claude.....	505
Effets physiologiques des courants électriques (Sur les), par M. le Dr Weiss.....	417
Étude expérimentale sur la résistance des rails d'acier, en courant alternatif, par M. C. Villiers.....	529
Étude expérimentale sur la résistance des rails d'acier en courant alternatif (Observations), par M. Boucherot.....	538
Expériences sur l'électrocution effectuées au Laboratoire central d'Électricité par la Commission chargée d'élaborer le texte de l'instruction sur les premiers soins à donner aux victimes des accidents électriques, par M. Zacon.....	437
Fréquencemètre enregistreur et sur le principe d'un relais ou servomoteur sans réaction (Sur un), par M. H. Abraham.....	125
Installations électriques du Chemin de fer électrique souterrain Nord-Sud de Paris (Les), par M. J. Petit.....	293
L'Arc en vase clos avec charbons minéralisés (Observation sur), par M. Blondel.....	235
Logomètre et ses applications (Le), par M. L. Joly.....	79
Mesures magnétiques industrielles (Observations sur les), par M. H. Armagnat.....	365
Mesures magnétiques industrielles (Observations sur les), par M. R. Jouaust.....	387
Note au sujet du danger spécial des courants alternatifs provenant de la capacité, par M. Guéry.....	499
Note relative aux dispositions adoptées par la Société Sud-Lumière pour les traversées de chemin de fer.....	112
Notes de voyage sur quelques laboratoires américains, par M. F. Laporte.....	137
Nouvelle lampe à arc en vase clos avec charbons minéralisés, par M. Aliamet.....	195
Nouvelle lampe à arc en vase clos avec charbons minéralisés (Observation), par M. Lecomte.....	208
Nouvel oscillateur à étincelles soufflées et électrodes tournantes de MM. Ducretet et Roger, par M. E. Roger.....	391
Propriétés magnétiques du fer aux fréquences élevées (Les), par M. Jouaust.....	49
Simplification des récepteurs d'ondes hertziennes par l'usage de détecteurs avec ou sans force électromotrice. Récepteurs portatifs, par M. P. Jégou.....	68
Simplification des récepteurs d'ondes hertziennes par l'usage de détecteurs avec ou sans force électromotrice. Récepteurs portatifs (Observation), par M. Tissot.....	166

	Pages.
Surintensités à la fermeture des circuits (Sur les), par M. P. Bunet.....	253
Surensions, surintensités et destructions des isolants par l'ozone, par M. Giles.....	13
Surensions, surintensités et destructions des isolants par l'ozone (Observations), par MM. Grosselin, Boucherot, Giles... ..	37
Théories électriques de la lumière et des mouvements mécaniques (Sur les), par M. G. Lippmann.....	243
Unités électriques employées au Laboratoire central d'Électricité à partir du 1 ^{er} jan- vier 1911 (Les), par M. Janet.....	9
Unités photométriques (Au sujet des), par M. Blondel... ..	228
Voltmètre électrostatique à lecture directe pour très haute tension de MM. Abraham et Villard, par M. Abraham	247



TABLE ALPHABÉTIQUE DES AUTEURS

CITÉS DANS LE TOME I (3^e SÉRIE).

	Pages
ABRAHAM (H.). — Sur un fréquencesmètre enregistreur et sur le principe d'un relais ou servomoteur sans réaction.....	125
ABRAHAM (H.). — Voltmètre électrostatique à lecture directe pour très haute tension de MM. Abraham et Villard	247
ALIAMET (M.). — Nouvelle lampe à arc en vase clos avec charbons minéralisés	195
ALLAIN-LAUNAY (E.). — Force motrice d'atelier. Guide pratique pour le choix et l'installation de la force motrice dans les ateliers (<i>Bibl.</i>)	62
ARMAGNAT (H.). — Observations sur les mesures magnétiques industrielles	365
BARBILLION (L.). — Régulation des groupes électrogènes (<i>Bibl.</i>)	169
BLOCH (L.). — Principes de la technique de l'éclairage (<i>Bibl.</i>)	597
BLONDEL (A.). — Au sujet des unités photométriques	228
BLONDEL (A.). — Observation sur l'arc en vase clos avec charbons minéralisés	235
BOCHET (A.). — Allocution	225
BOUCHEROT (P.). — A propos des courts circuits d'alternateurs	285
BOUCHEROT (P.). — Sur les coefficients d'inductance	211
BOUCHEROT (P.). — Observations sur l'étude expérimentale sur la résistance des rails d'acier, en courant alternatif	538
BOUCHEROT, GILES, GROSSELIN. — Observations sur les surtensions, surintensités et destructions des isolants par l'ozone	37
BRIOU (D ^r G.). — Guide de la pratique électrique (<i>Bibl.</i>)	58
BRUNSWICK (E.). — Compte rendu au nom de la 1 ^{re} Section de l'étude relative aux phénomènes électromagnétiques dus à la mise en court circuit des machines, étude présentée par M. Boucherot au Congrès de Turin	555
BUNET (P.). — Sur les surintensités à la fermeture des circuits	253
BUNET (P.). — Observations sur la compréhension des effets de peau	554
BURALI FORTI (C.) et MARCOLONGO (B.). — Eléments de Calcul vectoriel (<i>Bibl.</i>)....	170
CAHEN (O.). — Introduction à l'établissement des lignes aériennes de transports d'énergie électrique (<i>Bibl.</i>)	61
CELLERIER (J.). — Rapport de la Commission des Comptes pour l'Exercice 1910	174
CLAUDE (G.). — L'éclairage au Néon	505
CORDIER (F.). — Les turbines à vapeur (<i>Bibl.</i>)	229
DENIS (P.). — Moteurs électriques à courant continu et leurs dispositifs de commande (<i>Bibl.</i>)	361
DRUNAU (P.). — La théorie corpusculaire de l'Électricité. Les électrons et les ions (<i>Bibl.</i>)	596

	Pages
ESCARD (J.). — *Les substances isolantes et les méthodes d'isolement utilisées dans l'industrie électrique (<i>Bibl.</i>)	169
FOVEAU DE COURMELLES (D ^r). — L'année électrique, électrothérapique et radiographique (<i>Bibl.</i>)	360
GÉRARD (E.). — Leçons sur l'Electricité (<i>Bibl.</i>)	230
GILES (G.). — Surtensions, surintensités et destructions des isolants par l'ozone	13
GILES, BOUCHEROT, GROSSELIN. — Observations sur les surtensions, surintensités et destructions des isolants par l'ozone	37
GIRAULT (P.). — Sur la compréhension de l'effet de peau	543
GOULLIART (A.). — Précis d'Électricité industrielle (<i>Bibl.</i>)	61
GRAETZ (D ^r L.). — L'Électricité et ses applications (<i>Bibl.</i>)	229
GROSSELIN, BOUCHEROT, GILES. — Observations sur les surtensions, surintensités et destructions des isolants par l'ozone	37
GRUET (Ch.). — Manuel pratique d'Électricité industrielle (<i>Bibl.</i>)	62
GUÉRY (F.). — Note au sujet du danger spécial des courants alternatifs provenant de la capacité	499
GUTTON (E.). — Génératrices de courants et moteurs électriques. Introduction à l'étude de l'Électrotechnique appliquée (<i>Bibl.</i>)	169
HATFIELD (H.). — Les compteurs électrolytiques	99
ILIOVICI (A.). — Méthodes et appareils de mesures électriques et magnétiques (<i>Bibl.</i>)	58
ISTEL (P.) et LEMONON (E.). — Traité juridique de l'Industrie électrique (<i>Bibl.</i>)	360
JANET (P.). — Compte rendu sur le Laboratoire central et l'École supérieure d'Électricité	180
JANET (P.). — Les unités électriques employées au Laboratoire central d'Électricité à partir du 1 ^{er} janvier 1911	9
JÉGOU (P.). — Simplification des récepteurs d'ondes hertziennes par l'usage de détecteurs avec ou sans force électromotrice. Récepteurs portatifs	68
JOLY (L.). — Le logomètre et ses applications	79
JOUAUST (R.). — Le ferro-magnétisme. Applications industrielles (<i>Bibl.</i>)	397
JOUAUST (R.). — Les propriétés magnétiques du fer aux fréquences élevées	49
JOUAUST (R.). — Observations sur les mesures magnétiques industrielles	387
LAPORTE (F.). — Notes de voyage sur quelques laboratoires américains	137
LECOMTE (A.). — Observation sur la nouvelle lampe à arc en vase clos avec charbons minéralisés	208
LÉMONON (E.) et ISTEL (P.). — Traité juridique de l'industrie électrique (<i>Bibl.</i>)	360
LE SOUHAITIER (R.). — Technologie électrique (<i>Bibl.</i>)	229
LIPPMANN (G.). — Allocution	227
LIPPMANN (G.). — Sur les théories électriques de la lumière et des mouvements mécaniques	243
LOPPÉ (F.). — Encyclopédie électrotechnique (<i>Bibl.</i>)	230
MARCOLONGO (B.) et BURALI FORTI (C.). — Éléments de Calcul vectoriel (<i>Bibl.</i>)	170
MAREC (E.). — Les enroulements industriels des machines à courant continu et à courants alternatifs; théorie et pratique (<i>Bibl.</i>)	59
MONTPELLIER (J.). — Agenda Dunod pour 1911 : Électricité (<i>Bibl.</i>)	61
NERNST (W.). — Traité de Chimie générale (<i>Bibl.</i>)	171
PACORET (E.). — La technique de la houille blanche et des transports d'énergie électrique (<i>Bibl.</i>)	397

PETIT (J.). — Les installations électriques du Chemin de fer électrique souterrain Nord-Sud de Paris	293
ROBERJOT (P.). — Cours élémentaire d'Électricité industrielle (<i>Bibl.</i>)	62
ROGER (E.). — Nouvel oscillateur à étincelles soufflées et électrodes tournantes de MM. Ducretet et Roger	391
ROUX (J.). — Formulaire de l'Électricien et du Mécanicien (<i>Bibl.</i>)	361
SARTORI (G.). — La technique pratique des courants alternatifs (<i>Bibl.</i>)	70
SÉVERIN (J.). — Toute la Chimie minérale par l'Électricité (<i>Bibl.</i>)	71
SWYNGEDAUF (R.). — Sur la commutation dans les dynamos à courant continu ...	523
TISSOT (C.). — Observation sur la simplification des récepteurs d'ondes hertziennes par l'usage de détecteurs avec ou sans force électromotrice. Récepteurs portatifs	166
VALBREUZE (R. DE). — Compte rendu sommaire de l'excursion faite dans le sud de la France	399
VALBREUZE (R. DE). — Notions générales sur la Télégraphie et la Téléphonie sans fil (<i>Bibl.</i>)	60
VILLIERS (C.). — Étude expérimentale sur la résistance des rails d'acier, en courant alternatif	529
WEISS (D ^r). — Sur les effets physiologiques des courants électriques	117
WIEVEGER (H.). — Recueil de problèmes avec solutions sur l'Électricité et ses applications pratiques (<i>Bibl.</i>)	169
ZACON. — Expériences sur l'électrocution effectuées au Laboratoire central d'Électricité par la Commission chargée d'élaborer le texte de l'instruction sur les premiers soins à donner aux victimes des accidents électriques	137
ZENNECK (J.). — Précis de Télégraphie sans fil. Complément de l'Ouvrage : Les oscillations et la télégraphie sans fil (<i>Bibl.</i>)	596



PARIS. — IMPRIMERIE GAUTHIER-VILLARS,
46581 Quai des Grands-Augustins, 55.













UNIVERSITY OF MINNESOTA
sci.pere ser.3:t.1

Soci et e internationale des electricie
Bulletin de la Soci et e internationale



3 1951 000 874 735 K



UNIVERSITY OF MINNESOTA
sci.pere ser.3:t.1

Soci et e internationale des electricie
Bulletin de la Soci et e internationale



3 1951 000 874 735 K

